SEPTEMBER 2005 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

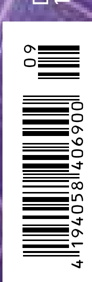
www.spektrum.de

QUANTENPHYSIK

Schwarze Löcher im Labor

Mit neuen Teilchenbeschleunigern könnten Physiker die Monster im Miniformat bald selbst erzeugen

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €



MEDIZIN

Kälteschlaf als Lebensretter

GEDÄCHTNIS

Wie Neuronen sich erinnern

PHYSIK

Warum kippt das Erdmagnetfeld?



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Wenn es demnächst Schwarze Löcher regnet

Es klingt schon ein bisschen verrückt: ein Schwarzes Loch im Do-it-yourself-Bausatz? Die Idee dazu ist gar nicht mal so neu. Theoretische Physiker neigen eben manchmal dazu, auch scheinbar abseitige Gedanken zu hegen – um dann nicht selten mit einem zündenden Vorschlag aufzuwarten. Aber beim Schwarzen Loch sah ihr Fantasieren lange nach bloßer mathematischer Spielerei aus.

Selbst mit dem Large Hadron Collider LHC, der 2007 beim Forschungszentrum Cern nahe Genf in Betrieb gehen soll, würde nach gängiger Theorie ein Energiefaktor von einer Billiarde (10^{15}) fehlen, um bei der Kollision von zwei Protonen ein Schwarzes Loch zu erzeugen. Doch wie unsere Titelgeschichte ab S. 32 beschreibt, stehen die Chancen gar nicht so schlecht, trotzdem in einer der Vakuumkammern des LHC ein solches Objekt hervorzubringen – allerdings nur in der Größe eines Elementarteilchens. Den Grund liefert die so genannte Stringtheorie, ein Versuch zur Vereinheitlichung aller Naturkräfte, die Einsteins Relativitätstheorie mit der Quantenphysik verschmelzen soll. Nach dieser Theorie sollte der Raum außer den bekannten drei Dimensionen sechs weitere besitzen. Diese wären zwar »verborgen«, würden aber bewirken, dass die Schwerkraft auf kurzen Distanzen weitaus stärker anwächst als nach Newtons Gravitationsgesetz. Wie sich die Theoretiker ausrechneten, würde in diesem Fall die Kollisionsenergie des LHC vermutlich ausreichen, um pro Sekunde maximal ein Schwarzes Loch zu generieren. Auch in der oberen Lufthülle der Erde sollten dann solche Minimonster entstehen können, wenn hochenergetische Partikel der Kosmischen Höhenstrahlung fast mit Lichtgeschwindigkeit auf die Atmosphäre knallen – ein kosmischer Regen der besonderen Art.

Die »kosmische Zensur« soll nackte Singularitäten verbieten

Das LHC-Experiment würde damit die Chance eröffnen, die Stringtheorie direkt im Labor zu testen – und herauszufinden, welche ihrer vielen möglichen Varianten auf die wirkliche Welt zutrifft. Auch Schwarze Löcher stecken noch voller Rätsel. Falls Berechnungen von Stephen Hawking von 1974 zutreffen, sollten die Miniexemplare, die im LHC oder in der oberen Atmosphäre entstehen, in Sekundenbruchteilen wieder verdampfen und sich dabei durch Gammastrahlung bemerkbar machen. Nun fragen sich die Theoretiker, was genau im letzten Augenblick der Selbstauflösung mit der so genannten Singularität passiert, die im Herzen auch des kleinsten Schwarzen Lochs verborgen sein soll. Verdampft sie gleichfalls und löst sich sozusagen still und leise in nichts auf? Oder wird sie im finalen Moment der Mikroexplosion nach außen hin direkt sichtbar, zeigt sich also »nackt«? Letzteres stünde im Widerspruch zu einer Hypothese, die der Oxforder Relativitätstheoretiker Roger Penrose mit »kosmischer Zensur« umschrieben hat. Danach dürfen »nackte Singularitäten« in der Natur nicht auftreten.

Von der Suche nach Extradimensionen des Raums hängt viel ab für die große Welttheorie. Ein erfolgreicher Nachweis der gravitativen Minimonster hätte also bedeutende Implikationen für unser Verständnis des Kosmos im ganz Großen wie im Allerkleinsten.

SEPTEMBER 2005

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Energiereiche Teilchenkollisionen könnten winzige Löcher in die Raumzeit reißen – mit Eigenschaften, wie sie Schwarze Löcher im All haben
Bild: Jean-François Podevin

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet
Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

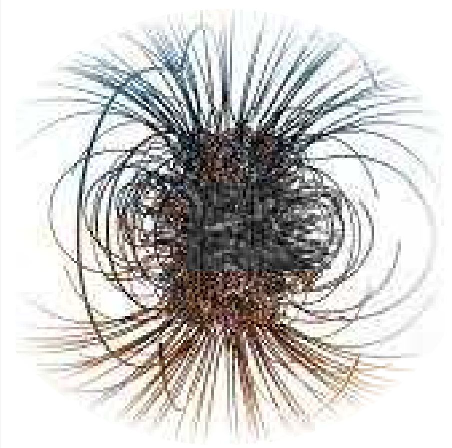


SEITE 26

MIKROSKOPIE

Schönheit unter der Linse

Die moderne Lichtmikroskopie präsentiert dem Betrachter winzige Strukturen von Tieren und Pflanzen kunstvoller als je gedacht



SEITE 54

ERDMAGNETFELD

Geheimnisvoller Geodynamo

Mehrere hundert Male in der Erdgeschichte hat sich das Magnetfeld unseres Planeten umgekehrt. Ein neuer Polaritätswechsel hat offenbar bereits eingesetzt. Was geht dabei im Innern des Erdkerns vor?

SEITE 62

GEDÄCHTNIS

Wie Erinnerungen haften bleiben

Was macht manche Erlebnisse unvergesslich, während andere schnell wieder dem Gedächtnis entschwinden? Entscheidend ist das zeitliche Muster der Nervenreizung



SEITE 74

PLANETEN

Mars zwischen Wasser und Wüste

Mit der Expedition der beiden Nasa-Rover Spirit und Opportunity konnten Mineralogen den Roten Planeten endlich im Detail kennen lernen. Offenbar gab es einst an vielen Stellen Wasser, an anderen herrschte dauerhaft das harsche Klima kalter Wüsten

MEDIZINISCHE FORSCHUNG SEITE 42

Kälteschlaf als Lebensretter

Spenderorgane könnten für längere Tansporte konserviert werden und Schwerverletzte bessere Überlebenschancen bekommen, ließen sich die Zellfunktionen schadlos auf extreme Sparflamme drosseln. Im Tierexperiment gelingt bereits Erstaunliches



TITEL QUANTENPHYSIK SEITE 32

Schwarze Löcher im Miniformat

Gefräßige Schwerkraftexoten sind sie, die im Weltall schon mal ganze Sterne verschlingen können. Jetzt halten Forscher es für möglich, die Monster im Miniformat selbst erzeugen zu können

SEITE 82

MIKROBIOLOGIE

Magenbakterien – nicht nur zum Schaden

Sie fördern Geschwüre und Magenkrebs. Aber seit diese Mikroben selten werden, häufen sich dafür bösartige Erkrankungen der Speiseröhre



SEITE 90

ANTHROPOMETRIE

Körpergröße als Wohlstandsindikator

Man nehme Maß – und kann dann rückwirkend erschließen, wie gut es Menschen verschiedener Altersgruppen während ihrer Jugend erging

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

S E P T E M B E R 2 0 0 5

REZENSIONEN

JUNGE WISSENSCHAFT

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

KOMMENTARE

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Die Leiter ins Unendliche

Alle natürlichen Zahlen Schritt für Schritt zu erfassen, ohne wirklich unendlich viele Schritte zu tun: Dieses Zauberkunststück vollbringt die mathematische – »vollständige« – Induktion



ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

LESERBRIEFE

Menschenrassen – eine Fiktion?

Mai 2005

Mit diesem Beitrag wird auf molekulargenetischer Ebene gezeigt, was bereits die so genannten klassischen genetischen Polymorphismen des menschlichen Blutes (Blutgruppen, Serumproteingruppen, Enzymgruppen, HLA-Gruppen, Hämoglobin-Varianten) ergeben haben, dass von wenigen Ausnahmen abgesehen die vielen erblichen Blutmerkmale grundsätzlich bei allen menschlichen Bevölkerungen vorkommen. Sie unterscheiden sich nur in den verschiedenen Genfrequenzen mehr oder weniger stark voneinander.

Sowohl diese »klassischen« genetischen Polymorphismen als auch die modernen molekulargenetisch nachweisbaren Polymorphismen haben dem in der Anthropologie früher häufig verwendeten Rassenbegriff endgültig den wissenschaftlichen Boden entzogen. Damit wurde auch gezeigt, dass die Einteilung unserer Spezies in mehr oder weniger zahlreiche Rassen und Unterrassen willkürlich und genetisch nicht begründet war.

Prof. Hubert Walter, Hameln

Die Kunst der richtigen Entscheidung

Juni 2005

Mit großem Interesse habe ich in Ihrer Zeitschrift diesen Artikel gelesen. F. Thomas Bruss gelingt es hier, mit anschaulichen Beispielen die manchmal so trockenen Zusammenhänge der Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung mit Anspruch und trotzdem leicht zugänglich zu erklären. Dabei wurde der praktische Nutzen deutlich.

Dr. Christian Ege, Saarbrücken

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg
E-Mail: wessels@spektrum.com

Wasserstoff

Juni 2005

Es bleibt die Frage offen, weshalb man sich überhaupt für eine Wasserstoffwirtschaft entscheiden soll, wo es doch Konzepte einer zukünftigen Energieversorgung mit technisch schon ausgereiften und bewährten Anlagen gibt. Ich denke zum Beispiel an die Pläne für die Versorgung mit Solarstrom aus dem Sonnengürtel der Erde, die Wissenschaftler des DLR und des ISET entwickelten. Dabei war der Grundgedanke, die Energie der Sonne vor allem dort zu nutzen, wo sie am intensivsten ist.

Das enorme Potenzial an nutzbarer Sonnenenergie veranschaulichten Wissenschaftler der DLR in einer Modellrechnung. Sie wiesen nach, dass schon ein Prozent der für solarthermische Kraftwerke geeigneten Flächen Nordafrikas genügte, um den Weltbedarf an elektrischer Energie zu decken.

Die hierfür vorgesehenen Parabolrinnenkraftwerke mit Wärmespeicher für den Nachtbetrieb produzieren in sonnenreichen Gegenden in nur fünf Monaten so viel Energie, wie zu ihrer Herstellung benötigt wurde. Bei einer Lebensdauer dieser Anlagen von etwa 30 Jahren führt das zu beachtlichen Gewinnen an Nutzenergie. Ähnliches gilt für Windkraftwerke, etwa an der Westküste Afrikas mit gleichmäßig hohen Windgeschwindigkeiten.

Kurt Kreß, Frankfurt am Main

Antwort der Redaktion:
Eine Wasserstoffwirtschaft schließt die Stromerzeugung mit Solaranlagen in Ländern hoher Sonneneinstrahlung keineswegs aus. Im Gegenteil würde es sich anbieten, dort Wasserstoff zu erzeugen und so die elektrische Energie zu speichern. Für den mobilen Einsatz lässt sich der solargewonnene Strom im Übrigen anders kaum nutzen. Alle Versuche, Elektroautos mit Batterien zu betreiben, wurden inzwischen auf Grund der technischen Probleme aufgegeben.

Immer wieder sonntags …

Leserbrief, Juli 2005

Herr Dr. Fuß schlägt vor, keine Schaltwoche, sondern lediglich Schalttage einzuführen.

Er übersieht dabei aber etwas sehr Wichtiges: Das Beibehalten der Abfolge der Wochentage ist für sehr viele Menschen nicht beliebig, sondern schlicht religiös notwendig. Der Sonntag der Christen, der Sabbat der Juden und der Freitag der Moslems sind feststehende Tage, die nicht einfach so um eins nach vorne oder hinten verschoben werden können.

Dem Pragmatiker mag das nebensächlich erscheinen, die Gläubigen der drei angesprochenen Religionen und deren Oberhäupter würden das aber sicher anders sehen. Die Schaltwoche ist daher die einzige elegante Lösung, die keine Spannungen zwischen Religion und wirtschaftlichem Vorteil hervorruft.

Ich bin mir ziemlich sicher, dass R.C. Henry seinen Vorschlag vor genau diesem Hintergrund gemacht hat.

Dr. C. Jansen, Bad Zwischenahn



ESO

▶ Der Krebsnebel im Sternbild Stier ist der Überrest einer Supernova.

Rätselhafte Supernovae

Juli 2005

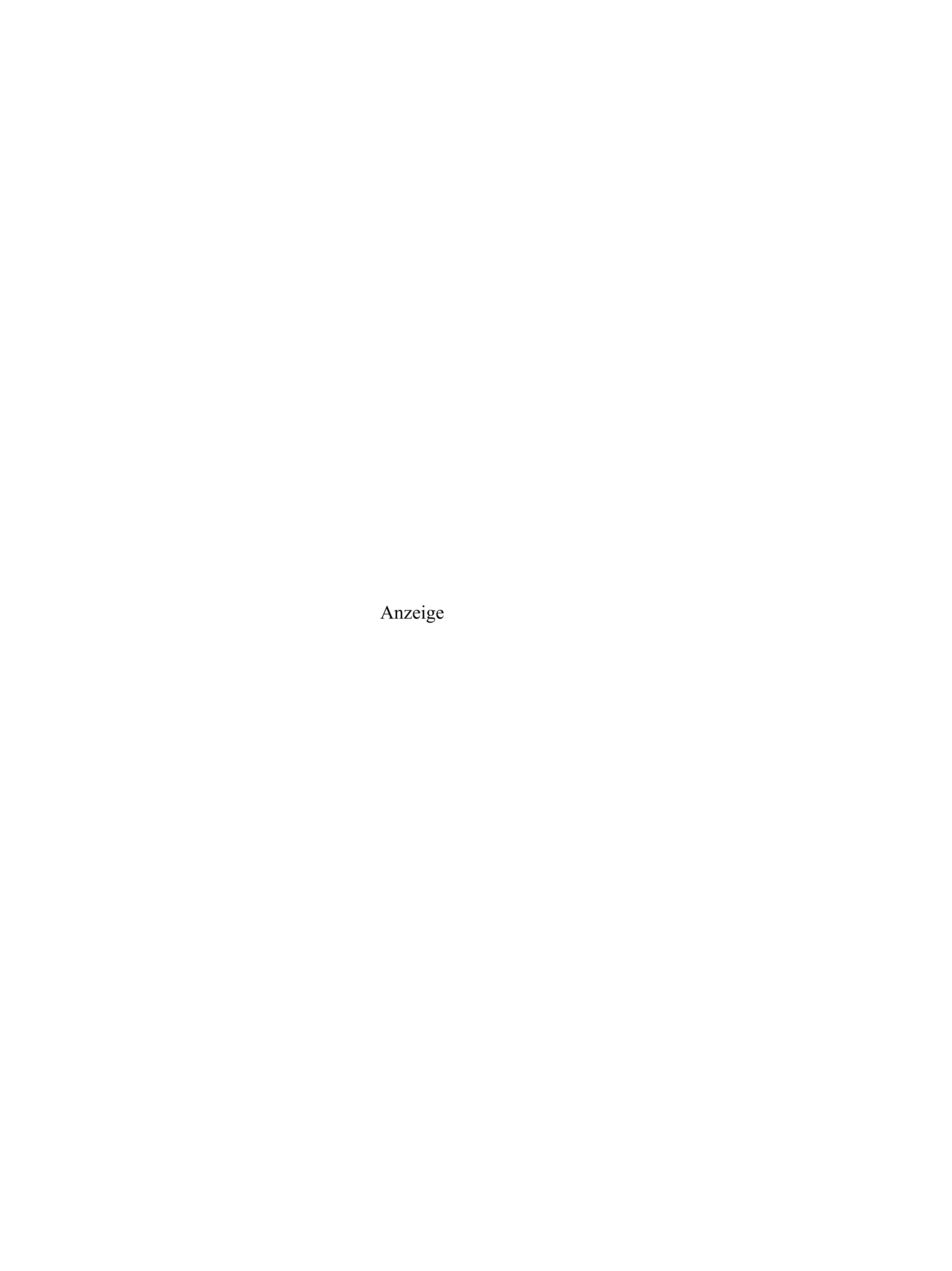
Auf S. 37 wird von der Supernova-Eplosion im Krebsnebel berichtet.

Bisher habe ich die oft zu sehende, fehlerhafte Übersetzung des im englischen Original »Crab Nebula« genannten Krabbennebels auf Unwissenheit zurückgeführt. Schließlich heißt der Nebel im Englischen ja nicht Cancer Nebula. Diesmal war ich jedoch sehr erstaunt, dass die Bezeichnung Krebsnebel auch in einem Artikel von Profis wie den Herren Hillebrandt, Janka und Müller zu finden ist. Ich kann mir nicht vorstellen, dass den Herren unwissentlich dieser Fehler unterlaufen ist. Bedeutet das, dass die ursprünglich fehlerhafte Übersetzung sich also mittlerweile im deutschen Sprachraum etabliert hat?

Kai Neuhaus, Aachen

Antwort des Autors Wolfgang Hillebrandt:
Es gibt das Sternbild Krebs (»Cancer«) und den Krebsnebel im Sternbild Stier (»Taurus«), den Überrest der Supernova 1054. Für diesen Nebel wurde in der deutschen Literatur immer schon der Name Krebsnebel und nicht Krabbennebel verwendet (siehe Lexikon der Astronomie. Spektrum Akademischer Verlag, 1995, S. 202 und 203).

Dass die angelsächsische Literatur dafür den Namen »Crab Nebula« verwendet, ist etwas unglücklich, lässt sich aber nicht ändern.


Anzeige

Das Jo-Jo

Wissenschaft im Alltag, Mai 2005

Das Jo-Jo war mit dem Namen im deutschen Sprachraum bereits vor 1916 bekannt.

Heinrich Albert Oppermann beschrieb in dem Roman »Hundert Jahre (1770 – 1870) Zeit- und Lebensbilder aus drei Generationen« im 2. Buch, 4. Kapitel: »Joujou de Normandie« das neue Spiel im deutschen Adel in der Zeit um 1790 mit folgenden Worten:

Die Gesellschaft, mit Ausnahme des Amtmannes und Karl Haus, fielen über den Korb her, als wären Goldschätze darin … »Das Joujou«, fuhr Lübrecht mit Wichtigkeit fort, indem er seinen Hut aufsetzte, den Knittel in die linke Hand nahm, den Zeigefinger der rechten Hand in die Schlinge an der Litze eines Joujou steckte und dieses auf und abrollen ließ, was indeß noch einige Ungeübtheit zeigte, »ist eine Erfindung der Normandie, durch die Emigranten in Deutschland verbreitet, weshalb es auch den Namen Emigré führt«.

»Bitte um Verzeihung«, unterbrach Karl, »das Joujou ist eine ostindische Erfindung, es wurde erfunden, der Tochter des Nabobs Seradscha Daula zu Murschidabad Belustigung zu gewähren; ein vornehmer Offizier brachte es nach England und schenkte es dem Prinzen von Wales, welcher sich, um seine schönen Hände zu zeigen, so sehr in das Spielzeug verliebte, daß er vom Morgen bis zum Abend damit spielte, wenn Mistreß Fitzherbert nicht etwa ein anderes Spiel vorzog.

Als er zum ersten Mal aus seiner Loge in dem neu erbauten Coventgardentheater sein Joujou in das Orchester hinabspielte, ward die Aufmerksamkeit aller von Hamlet ab und dem Prinzen zugewendet, dem man diese Unverschämtheit als Genialität anrechnete, und das Ding, mit dem er spielte, the Prince of Wales' toy nannte …«

Dr. Uwe Brinkhoff, Bad Zwischenahn

Umweltgifte vom Gabentisch der Natur

Juni 2005

Ich fand diesen Artikel sehr spannend und habe ihn mit großem Interesse gelesen.

Anmerken möchte ich, dass die chemischen Bezeichnungen inkonsequent verwendet wurden. Beispiel: Die 4 Halogenalkane (Mono-)Chlormethan, Dichlormethan, Trichlormethan und Tetrachlormethan (so sind sie regelkonform und logisch bezeichnet) werden als Methylchlorid, Dichlormethan, Chloroform und Tetrachlorkohlenstoff bezeichnet.

Dr. Klaus Kontermann, Stuttgart

Anmerkung der Redaktion:
Die im Artikel verwendeten Begriffe entsprechen in der Tat nicht immer der systematischen Nomenklatur. Wir halten es für sinnvoll, in einer populärwissenschaftlichen Zeitschrift die gebräuchlichen, aus der Chemiehistorie begründeten Namen den wissenschaftlichen vorzuziehen.

»Jugend forscht« - der 40. Bundeswettbewerb (I)

Juli 2005

Genau die gleiche Testanlage wie Jeannine Ziegler (Ultimatumspiel mit kleinen Kindern) habe ich bereits für meine Maturarbeit (Abgabetermin Januar 2003) gewählt. Darüber hinaus habe ich das Ultimatumspiel auch mit weiblichen und männlichen Gymnasiasten, Berufstätigen und Senioren durchgeführt, um herauszufinden, ob es geschlechtsspezifische und altersspezifische Unterschiede beim Fairnessverhalten gibt.

Die Resultate decken sich mit jenen von Jeannine Ziegler weit gehend. Etwas verallgemeinernd kann man sagen, dass Mädchen und Frauen sowie ganz junge und ganz alte Menschen ein faireres Verhalten zeigen als Jungen beziehungsweise Männer in mittleren Alterskategorien.

Alexander Hämmerli, Bern

Errata

Dinosaurier der Arktis

Juli 2005

Auf S. 29 wurde *Albertosaurus* fälschlicherweise mit drei statt zwei Fingern bei den vorderen Gliedmaßen abgebildet.

Die zehn Geschlechter von Amarete

Juli 2005

Auf S. 73 steht in Bezug auf Äcker: »Älter ist weiblich, jünger ist männlich …« Hier ist uns ein Dreher unterlaufen: Es ist genau umgekehrt.

Die Redaktion

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 2766
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Daniel Fischer, Dr. Markus Fischer, Dr. Eva Gottfried, Stephen Koszudowski, Dr. Olivia Meyer-Streng.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, D-70597 Stuttgart-Degerloch, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 26 vom 01.01.2005.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

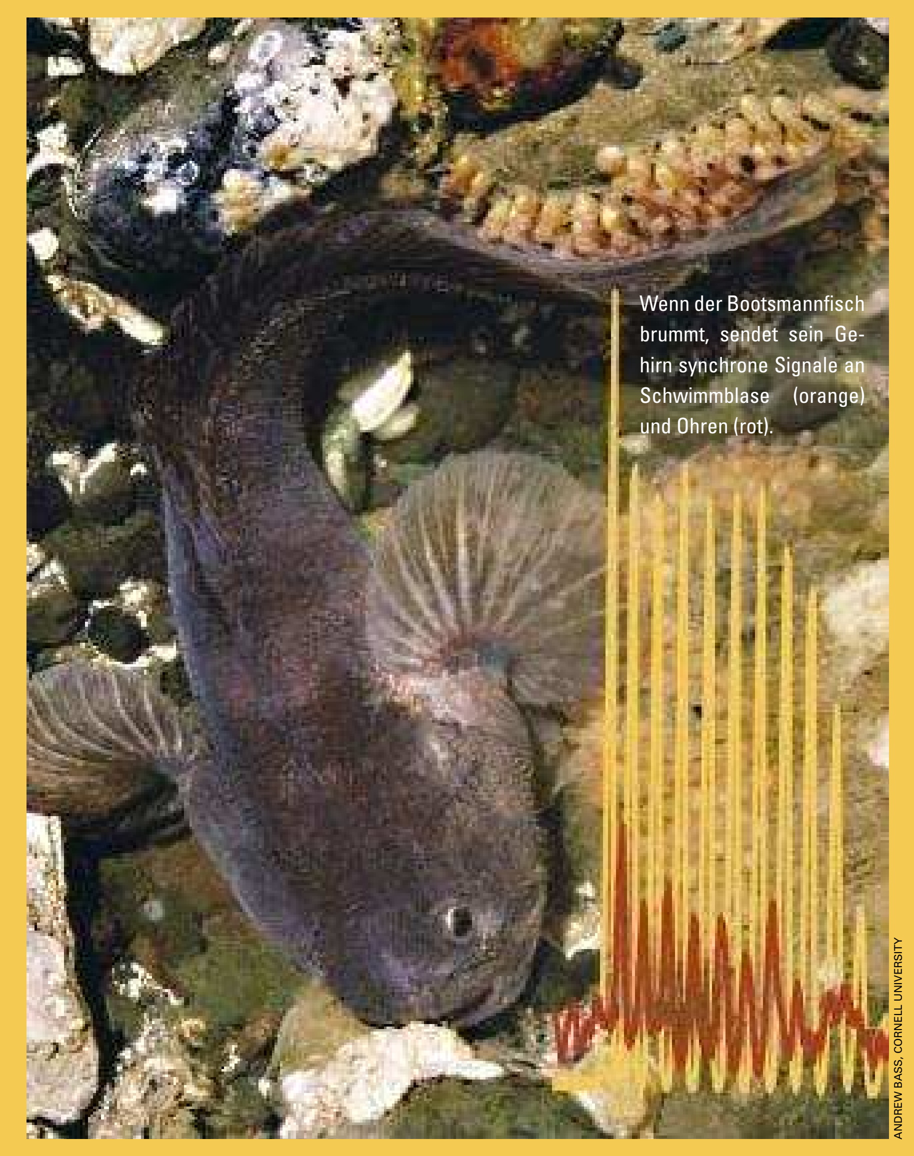
SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

HIRNFORSCHUNG

Brummfisch schützt sich vor eigenem Lärm

Als stumm kann man den Bootsmannfisch weiß Gott nicht bezeichnen: Um Weibchen zur Paarung zu animieren, gibt das Männchen Brummtöne von sich, die so laut sind, dass sie sogar Hausboote erzittern lassen. Eigentlich müsste der 25 Zentimeter lange Ruhestörer von dem Riesenlärm selbst taub werden. Wie er das verhindert, haben nun Forscher um Andrew Bass an der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York) entdeckt. Wenn das Gehirn von *Porichthys notatus* der Schwimmblase den Befehl zum Vibrieren gibt, sendet es die gleichen Signale auch an die Haarzellen in den Ohren. Diese schalten daraufhin einfach ab – jedenfalls in dem betreffenden Frequenzbereich. So kann der Kavalier trotz seines lautstarken Minnesangs sogar andere Geräusche wahrnehmen – und etwa feststellen, ob sich ein Fressfeind oder eine Herzensdame nähert. Die perfekte Koordination zwischen den Signalen an Schwimmblase und Ohren funktionierte selbst dann noch, wenn der Fisch künstlich gelähmt wurde und kein Brummen von sich geben konnte.

Journal of Neuroscience, Bd. 25, S. 5967



Wenn der Bootsmannfisch brummt, sendet sein Gehirn synchrone Signale an Schwimmblase (orange) und Ohren (rot).

ANDREW BASS, CORNELL UNIVERSITY

PALÄONTOLOGIE

Urtümliche Lebensform in 3-D

Die ersten bekannten Vielzeller gehören zu der etwa 550 Millionen Jahre alten Ediacara-Fauna. Die bisher bekannten Überreste dieser nur aus Weichteilen bestehenden Lebewesen haben zwischen Sandsteinablagerungen mehr schlecht als recht überdauert und sind nur als zweidimensionale Abdrücke erhalten. Nun aber haben Wissenschaftler um Shuhai Xiao vom Virginia Polytechnic Institute in Blacksburg im südchinesischen Dengying Versteinerungen entdeckt, bei denen die Hohlräume nicht platt gedrückt, sondern mit Kalzitkristallen gefüllt wurden. So blieb die ursprüngliche räumliche Struktur der Organismen bewahrt und liefert neue, interessante Einblicke in den Körperbau der primitiven, urtümlichen Lebensformen.

Wie die meisten Mitglieder der Ediacara-Fauna besaßen sie nur eine Zentralachse, aus der zahlreiche Röhrchen wuchsen. Bisher dachte man, diese Hohlräume seien am Ende geschlossen und mit Zytoplasma gefüllt gewesen. Die neuen Fossilien aber zeigen, dass sie offen und demnach leer waren.

Vermutlich lebte der Organismus flach am Meeresboden liegend – wie einige Pilze, Flechten oder Algen heute auch. Allerdings ähnelt er keinem existierenden Lebewesen und seine verwandtschaftlichen Beziehungen bleiben ungeklärt. Er starb aus, bevor im Kambrium vor rund 540 Millionen Jahren Tiere mit Skeletten und Schalen aufkamen.

Proceedings of the National Academy of Sciences, 19.7.2005, S. 10227

▼ Diese 550 Millionen Jahre alten, dreidimensional erhaltenen Fossilien zeigen Lebewesen mit röhrenartigen Verzweigungen.





PNAS 2005, VOL. 102 (10227-10232)

MIKROBIOLOGIE

Barmherzige Bakterien

»Edel sei die Mikrobe, hilfreich und gut!« Mit dieser Abwandlung des bekannten Goetheworts könnte man beschreiben, was Dale Kaiser und seine Kollegen an der kalifornischen Stanford-Universität entdeckt haben. Myxobakterien, die im Erdreich leben, gehen im Pulk auf Futtersuche. Dabei schließen sie sich mit ihren antennenähnlichen Pili jeweils an den Vordermann an. Dafür aber benötigen sie ein Protein namens Tgl, das manchmal durch eine Mutation verloren geht. Die Unglücksraben können ihren Pilus dann nicht mehr steuern und bleiben auf der Strecke.

Kaisers Team machte nun eine erstaunliche Beobachtung: Wenn bewegliche Bakterien auf gestrandete Kollegen trafen, wurden diese plötzlich wieder mobil. Die Forscher vermuteten deshalb, dass die gesunden Mikroben ihren Proteinvorrat brüderlich mit den behinderten Artgenossen teilten. Um das zu prüfen, konstruierten sie Bakterien, die zwar über Tgl verfügten, aber keine Antenne hatten und deshalb gleichfalls unbeweglich waren. Diese brachten sie mit Mutanten ohne das Protein zusammen. Wundersam geheilt, machten Letztere sich sogleich auf die Socken und ließen ihre Helfer zurück. So konnten die Forscher die Proteinmenge in den beiden nun getrennten Gruppen einzeln bestimmen. Wie sich zeigte, fehlte den Spendern etwa so viel Tgl, wie in den Empfängern nachweisbar war. *Science, 1. 7. 2005, S. 125*



SCIENCE 2005, VOL.309 (125-127), NUDLEMAN ET AL.

Die Proteinspende ihrer Kollegen macht bewegungsunfähige Bakterien wieder mobil, sodass sie die rote Linie überschreiten können.



NASA / JPL / CALTECH

Auf dem neu entdeckten Exoplaneten gehen gleich drei Sonnen unter – eine ganz nah, die anderen weit entfernt.

ASTRONOMIE

Unmöglicher Planet

Eigentlich dürfte es ihn nicht geben, und doch existiert er: ein neu entdeckter Planet im Sternsystem HD 188753. Aufgespürt hat ihn Maciej Konacki vom California Institute of Technology in Pasadena mit dem Keck-Teleskop auf Hawaii. Der Gasriese wiegt etwa 14-mal so viel wie Jupiter und umkreist einen Stern in nur 8 Millionen Kilometer Entfernung – knapp ein Siebtel des Bahnradius von Merkur.

Nach bisherigen Vorstellungen sind Gasriesen in so kurzem Abstand von ihrem Zentralstern zwar durchaus möglich. Aber sie können sich nicht an Ort und Stelle gebildet haben. Vielmehr muss aus einer fernen, kalten Staubwolke zunächst ein eisiger Kern kondensiert sein, der dann die gigantische Gashülle angelagert hat. Schließlich wanderte der fertige Planet an seine endgültige Position.

Bei dem neu entdeckten Gasriesen war dieses Szenario aber nicht möglich. Sein Mutterstern ist nämlich nicht allein, sondern hat zwei Kompagnons in Abständen, die der Distanz zwischen Sonne und Uranus beziehungsweise Saturn entsprechen. Diese hätten nicht nur mit ihrer Gravitation und Strahlung die benötigte Staubwolke aufgelöst, sondern auch die betreffende Raumregion erhitzt. Konacki und seine Kollegen schließen daraus, dass die gängige Theorie falsch sein muss. Damit aber dürften viel mehr extrasolare Planeten existieren, als die Astronomen sich bisher träumen ließen. *Nature, 14.7. 2005, S. 230*

VERHALTEN

Gewalt bei Affen anerzogen

Familiäre Gewalt pflanzt sich oft über Generationen fort. Liegt das an einer vererbten Disposition oder an einem verhängnisvollen Lerneffekt? Die Antwort hat Dario Maestripieri von der Universität Chicago nun bei Rhesusaffen gesucht. Auch unter ihnen gibt es Weibchen, die ihre Jungen beißen, schlagen oder treten, statt sie liebevoll zu umsorgen.

Der Verhaltensforscher verfolgte in seinem Experiment neugeborene Affenmädchen, von denen er die Hälfte bei Adoptivmüttern aufwachsen ließ, und beobachtete, wie sie später ihr eigenes Erstgeborenes behandelten. Das Ergebnis war eindeutig: Von sechzehn misshandelten Äffchen wurden neun ebenfalls gewalttätig; dagegen kümmerten sich die fünfzehn wohlbehütet aufgewachsenen Tiere allesamt auch ihrerseits fürsorglich um ihren Nachwuchs – gleich ob ihre leiblichen Mütter handgreiflich geworden waren oder nicht.

Bei den Rhesusaffen scheint Gewalttätigkeit also weit gehend anerzogen zu sein. Viel spricht dafür, dass dies ebenso beim Menschen gilt. *Proceeding of the National Academy of Sciences, 5.7. 2005, S. 9726*



STEPHANIE MCNICOLL, YERKES NPRC, EMORY UNIVERSITY

Affenkinder mit fürsorglichen Müttern kümmern sich später meist auch liebevoll um ihren eigenen Nachwuchs.

UMWELT

Feuertaufe der australischen Tierwelt

Als vor gut 50000 Jahren die ersten Menschen den fünften Kontinent besiedelten, verschwanden nach und nach viele Tierarten. Ob die Einwanderer daran eine Mitschuld trugen, wird immer wieder diskutiert. Nach Ansicht mancher Forscher lösten sie durch eingeschleppte Krankheiten oder Überjagen das Artensterben aus. Andere sehen die Ursache des Niedergangs in natürlichen Prozessen wie Klimaänderungen.

Gifford Miller von der Universität von Colorado in Boulder und seine Kollegen haben nun eine neue Theorie in die Debatte geworfen. Demnach waren zündelnde Menschen für das Massensterben verantwortlich. Wie Miller vermutet, steckten die Neuankömmlinge immer wieder Grünflächen in Brand, um das Land zu erschließen und sich leichteren Zugang zu neuen Jagdgründen zu verschaffen. Dadurch verloren viele Tierarten ihre Nahrungsgrundlage.

Zum Beweis untersuchten die Forscher das Mengenverhältnis der Kohlenstoffisotope in fossilen Tierresten wie Wombat-Zähnen oder den Eierschalen von Emus und dem ausgestorbenen Riesenvogel *Genyornis*. Daraus zogen sie Rückschlüsse auf den Speiseplan der Tiere. Diese verzehrten demnach statt nahrhafter Büsche in steigendem Maße karge Wüstensträucher. Manche Arten wie *Genyornis* konnten sich dem veränderten Nahrungsangebot nicht anpassen und starben aus.

Science, 8.7.2005, S. 287



GIFFORD H. MILLER, UNIVERSITY OF COLORADO, BOULDER

▲ Fossile Eierschalen – hier vom ausgestorbenen Riesenvogel *Genyornis* – dokumentieren eine durch Brandrodung veränderte Vegetation.

PALÄANTHROPOLOGIE

Fußspuren der ersten Amerikaner?

Sie flohen vermutlich vor einem Vulkanausbruch und rannten um ihr Leben. Ihre versteinerten Fußspuren in der Vulkanasche fanden sich im Herbst 2003 in einem Steinbruch nahe der zentralmexikanischen Stadt Puebla. Nun konnten Silvia Gonzalez von der John-Moores-Universität in Liverpool und Matthew Bennett von der Universität Bournemouth durch Massenspektrometrie, Lumineszenz-Analysen und Radiokarbondatierungen ermitteln, wann sich die Szene abspielte: vor 40000 Jahren. Wenn dieser Wert stimmt, muss die Geschichte des amerikanischen Kontinents neu geschrieben werden. Bisher herrschte unter Paläanthropologen die Meinung, dass die ersten Menschen gegen Ende der letzten Eiszeit vor etwa 10000 bis 15000 Jahren auf dem Landweg über die damals trocken gefallene Beringstraße nach Amerika gekommen waren. Dies steht jetzt in Frage.

Mehr als 250 Fußabdrücke von Menschen, aber auch Vögeln, Katzen, Hunden und Paarhufern haben sich in die Asche eingegraben. Als der Wasserspiegel eines nahen Sees stieg, versteinerten sie und wurden im Lauf der Zeit durch weitere Ascheschichten überdeckt. Die Wissenschaftler haben die Abdrücke mit Laserverfahren gescannt und als 3-D-Modelle reproduziert, um sie der Nachwelt zu erhalten.

Summer Science Exhibition der Royal Society in London, 4.7.2005



Erzwingt dieser 40000 Jahre alte Fußabdruck eine Revision gängiger Theorien zur Besiedelungsgeschichte Amerikas?

BOURNEMOUTH UNIVERSITY

MEDIZIN

Früherkennung von Alzheimer

Bis zu neun Jahre vor dem Auftauchen erster Symptome konnten US-Forscher bei älteren Menschen Anzeichen für die Alzheimer-Krankheit erkennen. Als Indikator diente eine verminderte Stoffwechselaktivität im Hippocampus, jener Hirnregion, die für Lernen und Erinnerung zuständig ist. Leider unterscheidet sich dieses Areal, das einem Seepferdchen ähnelt, in Form und Position stark von Mensch zu Mensch. In Aufnahmen der Stoffwechselaktivität des Gehirns, die üblicherweise mittels Positronen-Emissionstomografie (PET) gemacht werden, lässt es sich deshalb nicht ohne Weiteres orten. Lisa Mosconi von der New York University und ihre Kollegen haben deshalb das Computerprogramm »Hip-Mask« entwickelt, das auf den PET-Scans zuverlässig einen Bereich innerhalb des Hippocampus identifiziert.

So konnten die Forscher in PET-Aufnahmen von 53 Teilnehmern einer Längsschnittstudie, deren geistige Verfassung neun bis 24 Jahre lang verfolgt worden war, den Metabolismus in dieser Region ermitteln. Bei 25 davon lagen die Werte schon beim ersten Scan 15 bis 40 Prozent unter dem Durchschnitt. Von diesen Personen litten am Ende der Studie sechs unter voll entwickeltem Alzheimer-Syndrom, während die anderen 19 milde kognitive Behinderungen aufwiesen.

Neurology, Bd. 64, S. 1860

Mitarbeit: Eva Hörschgen und Stephanie Hügler

UNIVERSITÄT TÜBINGEN, FOTO: JURAJ LIPTÁK





Eiszeitlicher Phallus

Die weiblichen Fruchtbarkeitssymbole der jüngeren Altsteinzeit – wie die berühmte Venus von Willendorf – haben nun ein männliches Gegenstück bekommen. Forscher unter Nicholas Conard von der Universität Tübingen entdeckten bei Grabungen in der Höhle »Hohle Fels« auf der Schwäbischen Alb im letzten Jahr 14 Siltsteinsplitter, die sie jetzt zu einem Phallus zusammensetzen konnten. Mit einer Länge von 19,2 und einer Dicke von 2,8 Zentimetern kommt das Objekt dem natürlichen Vorbild sehr nahe. Seine unzweideutige Form, nachträglich eingeschnittene, ringsumlaufende Linien an der Grenze zwischen Eichel und Schaft sowie Schleifspuren und die polierte Oberfläche weisen es klar als Werk eines menschlichen Bildhauers aus. Radiokarbondatierungen von Knochenstücken im gleichen Bodenhorizont ergaben ein Alter von etwa 28 000 Jahren. Damit gehört der Phallus zum so genannten Gravettien, dem auch die Venus von Willendorf zugeordnet wird, und ist etwas jünger als die Elfenbeinschnitzereien, die Conards Gruppe in den letzten Jahren am selben Fundort entdeckt hatte. Offenbar diente das gute Stück nicht nur kultischen Zwecken. So belegen Scharten eine Nutzung als Schlagstein. Außerdem könnte die glatte Oberfläche bedeuten, dass die frühen Albbewohner damit Leder bearbeiteten.

TEILCHENPHYSIK

Zeitreise zum Anfang des Alls

Mit Kollisionen zwischen Gold-Atomkernen erkundeten Physiker eine ungewöhnliche Zustandsform der Materie: das Quark-Gluon-Plasma. Ihre Ergebnisse lieferten zugleich Informationen über die Frühzeit des Kosmos.

Von Markus Pössel

Einige Teilchenbeschleuniger sind letztlich Supermikroskope, mit denen Physiker unsere Welt auf immer kleineren Größenskalen erforschen. Für andere wäre der Begriff Zeitmaschine angebrachter. So gelang jüngst mit dem US-Schwerionenbeschleuniger RHIC gleichsam ein Blick in das Universum vor rund 14 Milliarden Jahren. Damals bestand der gesamte Kosmos noch aus einer höchst exotischen Materieform: einem so genannten Quark-Gluon-Plasma. In ihm liegen Elementarteilchen, die heute nur im Verbund innerhalb größerer Partikel auftreten, einzeln vor.

Die langjährigen Messungen am RHIC (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2003, S. 21) erbrachten nun neue Hinweise auf die physikalischen Eigenschaften dieser ungewöhnlichen Erscheinungsform der Materie: Dachte man sie sich ursprünglich als eine Art Gas, so untermauern die neuen Befunde theoretische Ergebnisse, wonach sie eher einer Flüssigkeit ähnelt.

Das Universum expandiert. Lassen wir seine Entwicklung in Gedanken rückwärts laufen, rücken die Galaxien, die heute das All bevölkern, immer näher zusammen. Zu einem Zeitpunkt vor knapp 14 Milliarden Jahren gelangen wir auf diese Weise in eine Welt, die völlig verschieden von der unsrigen ist: Es gibt keine Sterne und Galaxien mehr; das Universum ist fast strukturlos und mit dichtem Gas gefüllt. Die Weiterreise in die Vergangenheit führt uns bei stetig steigender Temperatur und Dichte dann zunächst in ein Gewirr von Atombruchstücken und schließlich zu einer Suppe aus Elementarteilchen, deren mittlere Dichte die eines Atomkerns übersteigt.

Dass der beobachtbare Weltraum aus solch einem extrem kompakten Urzustand hervorgegangen ist, ergibt sich aus kosmologischen Modellen, die auf Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie fußen und durch zahlreiche astronomische Beobachtungen gestützt werden. An der Realität dieses »Urknalls« besteht deshalb kein Zweifel mehr. Im Detail sind Aussagen über die Verhältnisse im frühen Universum allerdings immer nur so sicher wie unser Wissen über das Verhalten von Materie unter solchen Extrembedingungen. Mit Beschleunigern wie dem bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt, dem Super-Protonen-Synchrotron des europäischen Kernforschungszentrums Cern in Genf und eben dem relativistischen Schwerionencollider RHIC auf Long Island (New York) bemühen sich die Physiker deshalb, die Temperatur- und Dichteverhältnisse des Kosmos in den ersten millionstel Sekunden des Urknalls experimentell nachzustellen.

Von besonderem Interesse ist dabei ein so genannter Phasenübergang, bei dem sich die physikalischen Eigenschaften der Materie – ähnlich wie beim Schmelzen von Eis – schlagartig drastisch ändern. Diese Umwandlung hat mit besonderen Eigenschaften der starken Kernkraft und der Elementarteilchen zu tun, auf die sie wirken. Gemäß dem Standardmodell der Teilchenphysik bestehen die Protonen und Neutronen der Atomkerne ihrerseits aus noch »kleineren« Partikeln.

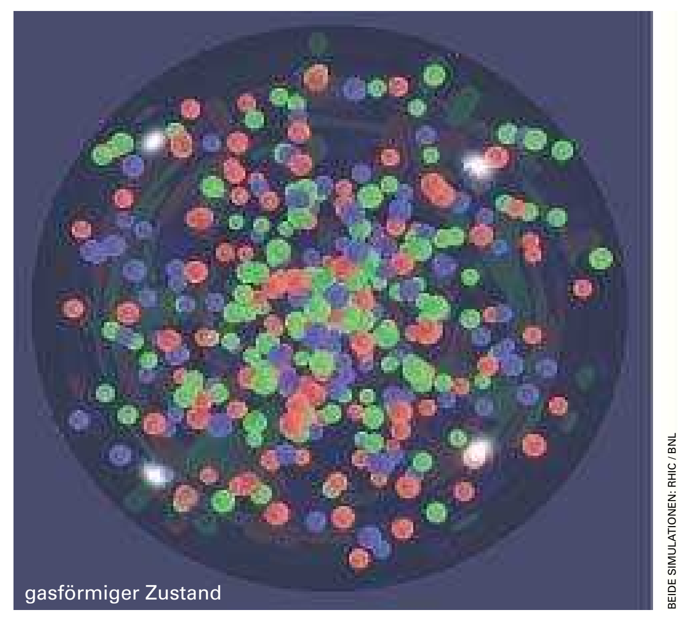
Auftritt nur im Kollektiv

Diese so genannten Quarks trifft man freilich nie einzeln an: Die starke Kernkraft, eine der vier Grundkräfte der Physik, sorgt dafür, dass sie nur im Kollektiv auftreten können – zusammengehalten durch den Austausch spezieller Haftpartikel, der »Gluonen«. Ein einzelnes Quark aus dem Verbund zu lösen ist unmöglich: Je weiter es sich von seinen Partnern entfernt, desto stärker wird es zurückgezogen – als hinge es an einem Gummiband. Allenfalls entstehen aus der Energie, die man aufwendet, um ein Quark freizusetzen, neue Quarkverbände.

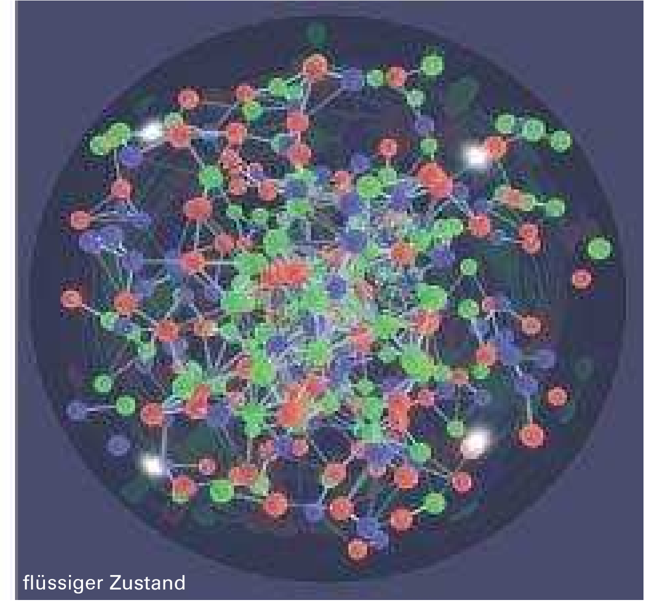
Seit Mitte der 1970er Jahre vermuten die Physiker allerdings, dass das nicht unter allen Umständen gilt. Oberhalb einer bestimmten Temperatur und Dichte sollten die Quarkverbände vielmehr in ein Gewirr einzelner Quarks und Gluo-

STAR / RHIC

Die Kollision zweier fast lichtschneller Gold-Atomkerne hinterließ in dem Detektor Star – einem von vier Nachweisgeräten am Schwerionenbeschleuniger RHIC – jeweils Tausende von Teilchenspuren. Deren genaue Analyse ergab Hinweise auf die kurzfristige Existenz eines stark wechselwirkenden Quark-Gluon-Plasmas.



BEIDE SIMULATIONEN: RHIC / BNL



Ursprünglich dachte man sich das Quark-Gluon-Plasma als Gas aus sich völlig unabhängig bewegenden Teilchen (links). Die jüngsten Experimente bestätigen dagegen neuere theoretische Ergebnisse, wonach es zumindest in einem Übergangsbereich eher einer Flüssigkeit gleicht, in der wechselnde Gruppen von Teilchen kurzfristig größere Verbände bilden (rechts).

nen zerfallen, die nicht mehr zu größeren Teilchen verknüpft sind, sondern direkt miteinander wechselwirken. Physiker nennen diesen Zustand Quark-Gluon-Plasma – in Analogie zu jenem Gemisch aus Atomkernen und Elektronen, in das sich Atome bei genügend hoher Energie auflösen. Einblicke in seine mutmaßlichen Eigenschaften ließen sich bisher nur am Computer gewinnen: mit Hilfe so genannter Gitterrechnungen.

Seit den 1990er Jahren ergaben sich dabei unter anderem Hinweise darauf, dass die ursprüngliche Vorstellung, wonach die Teilchen in einem Quark-Gluon-Plasma wie in einem Gas frei durcheinander fliegen, allzu vereinfacht war. Zumindest in der Grenzregion des Phasenübergangs sollte sich das Partikelgemisch vielmehr wie eine Art Flüssigkeit verhalten, in der die Quarks und Gluonen stark miteinander wechselwirken. Erst bei noch höheren Energien gewännen sie ihre volle Freiheit.

Ein Quark-Gluon-Plasma unter kontrollierten Bedingungen herzustellen ist ein lang gehegter Wunsch der Physiker. Am RHIC sind sie diesem Ziel jetzt so nahe gekommen wie nie zuvor. Dazu brachten sie in den beiden fast vier Kilometer langen Beschleunigerringen Gold-Atomkerne, die knapp 200 Protonen und Neutronen enthalten, auf über 99,9 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. An vier Punkten ließen sie die zwei gegenläufigen Teilchenstrahlen aufeinander treffen. Die Detektoren Star, Phenix, Phobos und Brahms maßen, was dabei geschah.

Wann immer zwei der superschnellen Goldkerne aufeinander prallten, wurde ein Großteil ihrer Energie – gemäß Einsteins berühmter Formel – in einen winzigen Feuerball aus bis zu zehntausend Materieteilchen umgewandelt. Er hatte eine Temperatur von einigen Billionen Grad und etwa die hundertfache Dichte eines herkömmlichen Atomkerns – Verhältnisse, unter denen sich nach den Berechnungen der Theoretiker ein Quark-Gluon-Plasma bilden sollte.

Tatsächlich enthalten die Daten aller vier Experimente Indizien, dass dieser Zustand zumindest ansatzweise erreicht wurde. Demnach verhielt sich die Materie im Inneren des Feuerballs wie eine Art dichte Flüssigkeit – in Einklang mit den theoretischen Vorhersagen für ein stark wechselwirkendes Quark-Gluon-Plasma. Der Feuerball selbst war zwar nicht zu beobachten. Aber Rückschlüsse auf seine Beschaffenheit ließen sich aus den Tausenden von Sekundärteilchen ziehen, in die er bereits einige quadrillionstel (billionstel billionstel) Sekunden nach seiner Entstehung zerfiel (Bild links). Sie hinterließen Spuren in den Detektoren, aus denen sich ihre Flugbahn und Energie ergab. Die Auswertung dieser Daten legte nahe, dass der Feuerball auf die unvermeidlichen Druckunterschiede nach der Kollision mit einem kollektiven Fließen der Teilchen reagierte, wie man es von einer Flüssigkeit erwarten würde, nicht aber von einem Gas.

Tröpfchen der kosmischen Ursuppe?

Dafür sprach auch ein weiteres Indiz. Wenn bei der hochenergetischen Kollision von Protonen oder Neutronen zwei der enthaltenen Quarks oder Gluonen direkt aufeinander treffen, entsteht aus jedem nach dem Zusammenstoß typischerweise ein »Jet«: ein Pulk kegelförmig auseinander strebender Teilchen, die sich im Detektor nachweisen lassen. Bei den Gold-Gold-Kollisionen wurden allerdings deutlich weniger solcher Jets gemessen, als Quark-Gluon-Stöße zu erwarten wären. Am einfachsten lässt sich das Defizit mit der Anwesenheit eines stark wechselwirkenden Quark-Gluon-Plasmas erklären. Fliegt etwa ein Quark nach dem Zusammenprall durch dieses dichte, hochreaktive Medium, verliert es dabei so viel Energie, dass sich am Ende kein nachweisbarer Jet mehr bilden kann.

Doch trotz dieser viel sagenden Indizien steht noch nicht mit letzter Sicherheit fest, ob in den RHIC-Experimenten wirklich ein Quark-Gluon-Plasma entstanden ist. Um aus den Eigenschaften der vielen tausend Teilchen, in die der Feuerball zerstiebt, dessen grundlegende Eigenschaften zu rekonstruieren, bedarf es einer komplexen Schlusskette. Einige ihrer Glieder aber müssen durch gezielte experimentelle wie theoretische Untersuchungen noch verstärkt werden, bevor sie als tragfest gelten können. So wird sich wohl erst in einigen Jahren erweisen, ob die Forscher am RHIC tatsächlich ein kleines Tröpfchen jener besonderen Suppe, die für eine winzig kurze Zeit nach dem Urknall in Erscheinung trat, auf die heutige Erde holen konnten.

Markus Pössel ist promovierter Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam.

PLANETOLOGIE

Eisvulkan auf Titan?

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Der größte Saturnmond hält die Planetenforscher weiter in Atem: Auf Cassini-Fotos fanden sie jetzt eine Formation, die sie als exotischen Vulkan deuten. Unter der Titankruste soll sich zudem ein globaler Ozean verbergen.

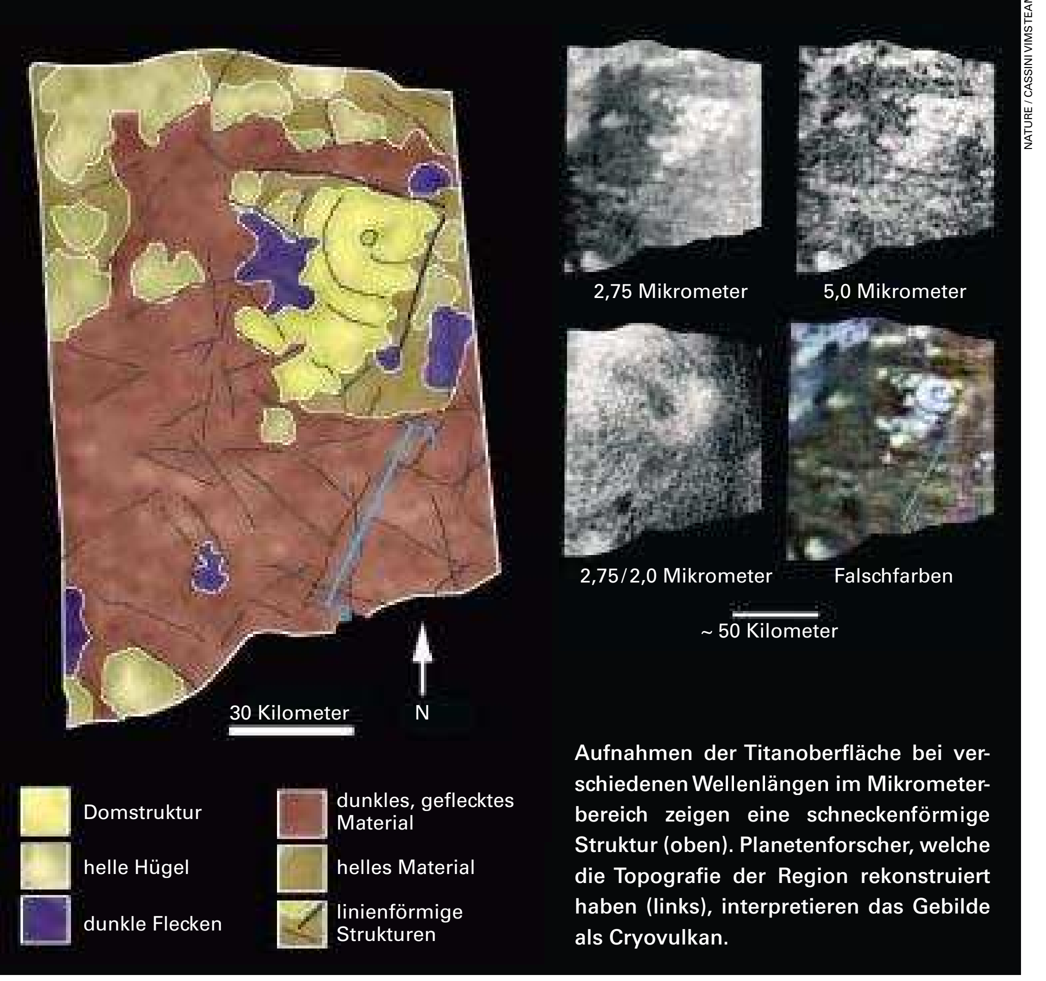
Von Thorsten Dambeck

Schon zu Jahresbeginn hatte der Sinkflug von Huygens durch die Titan-Atmosphäre den Verdacht bestärkt, dass aus dem Boden des Saturn-Trabanten Methan entweichen könnte. Auf dem Weg abwärts waren den Sensoren der europäischen Raumsonde steigende Konzentrationen des Kohlenwasserstoffs aufgefallen. Mit einem Anteil von zwei bis sechs Prozent bildet Methan die zweithäufigste Komponente in der vom Stickstoff dominierten Gashülle des Eismonds. Da es durch photochemischen Abbau in der oberen Atmosphäre in geologisch kurzer Zeit verschwinden würde, muss auf Titan folglich ein Mechanismus existieren, der für ergiebigen Nachschub an dem Gas sorgt.

Ist das Methan vielleicht vulkanischen Ursprungs? Seit Langem vermuten Planetenforscher, dass auf dem zweitgrößten Mond des Sonnensystems so genannte Cryovulkane aktiv sein könnten. Anders als die Feuerberge auf der Erde oder auf unseren Nachbarplaneten Venus und Mars speien sie keine glutflüssige Lava. Vielmehr fördern sie leicht schmelzbare Stoffe, die tief im Boden als »Eis« vorliegen. Durch Wärme aus dem Inneren des Monds aufgetaut, drängen diese flüchtigen Substanzen in den Cryovulkanen zur Oberfläche.

Schon vor sechzehn Jahren entdeckte Voyager 2 Hinweise auf geysirartige Ausbrüche auf Triton, als die Nasa-Sonde den größten Neptun-Mond fotografierte. Weitere Trabanten der äußeren Planeten, etwa Saturns Enceladus oder der Jupiter-Begleiter Europa, stehen im Verdacht dieser eisigen Spielart des Vulkanismus.

Nun scheint der US-Sonde Cassini, die seit Juli 2004 im Saturnsystem kreist, erstmals ein Porträt eines Cryovulkans auf Titan gelungen zu sein. Die Aufnahme schoss das Vim-Spektrometer an Bord des Raumfahrzeugs, als es im vergangenen Oktober dicht an dem Saturnmond vorbeiflog. Abgebildet ist ein Areal acht Breitengrade nördlich des Äquators, im Westen der hellen »Xanadu«-Region. Am Rand eines rund 3000 Kilometer langen Dunkelgebiets befindet sich dort eine gewundene Struktur mit etwa dreißig Kilometer Durchmesser, die aus der Vogelperspektive der Cassini-Sonde an ein Schneckenhaus erinnert.



Aufnahmen der Titanoberfläche bei verschiedenen Wellenlängen im Mikrometerbereich zeigen eine schneckenförmige Struktur (oben). Planetenforscher, welche die Topografie der Region rekonstruiert haben (links), interpretieren das Gebilde als Cryovulkan.

Nach genauer Analyse der Daten kam ein Team um Christophe Sotin von der Universität Nantes und Ralf Jaumann vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zu dem Schluss, dass das einzigartige Gebilde ein Cryovulkan sein muss *(Nature, 9. 6. 2005, S. 786)*. Schon im Frühjahr hatten Cassini-Wissenschaftler Strukturen auf Radarbildern anderer Titan-Regionen als Gegenstücke zu irdischen Lavaströmen interpretiert, die allerdings sicherlich kein erstarrtes Magma zeigen, sondern die gefrorenen Überreste einer niedriger schmelzenden Substanz.

Blick auf die dunstverhüllte Oberfläche

Das »Visual and Infrared Mapping Spectrometer« (Vims) ist eine Art Farbkamera, die ein Motiv gleichzeitig bei 352 Wellenlängen zwischen 300 und 5100 Nanometern aufnehmen kann. Damit erfasst sie einen deutlich größeren Bereich als den zwischen 380 bis 760 Nanometern, für den das menschliche Auge empfindlich ist. Bei diesen optischen Wellenlängen machen Dunstpartikel die Titanatmosphäre undurchsichtig; dagegen ist sie in einer Reihe schmaler »Fenster« im infraroten Spektralbereich, den Vims mit abdeckt, weit gehend transparent. Durch diese Fenster kann das in Italien und den USA gebaute Instrument ▷

GLOSSE

Samenloser Sex stoppt Seitensprünge

Wie Hähne ihre Hennen bei der Stange halten

Ach, was muss man oft von bösen Frauen hören oder lesen, die, obwohl in festen Händen, fremden Herren sich zuwenden!

Und dies hat, Gott sei's geklagt, nicht selten schlimme Folgen. Nehmen wir nur einmal Madame Bovary: Ehe kaputt, Leben kaputt (dafür Aufnahme in den Literaturkanon). Oder machen wir ruhig einen Abstecher in die profane Alltagswelt: Wie viele gehörnte Ehemänner erfahren erst nach Jahren, dass ihr vermeintlicher Nachwuchs nicht von ihnen stammt und sie stattdessen Kuckuckskinder großgezogen haben. Die Folge: teure Gerichtsverfahren, zerstörte Familien …

Schuld an allem ist natürlich Eva, die Urmutter, die Verführerin mit der Schlange … man kennt das ja. Doch für Wissenschaftsgläubige hat auch die Biologie daran Anteil. Glaubt man den Soziobiologen, können Frauen vor allem zur Zeit des Eisprungs gar nicht anders, als in fremden Betten zu wildern. Schließlich bevorzugt genau dann ihre Nase die besonders männlichen Draufgängertypen ohne Brutpflegeambitionen gegenüber den sonst geschätzten braven Familienvätern.

Nun ist der Mensch zwar ein besonderes Tier, aber eben wahrscheinlich doch nicht viel anders gestrickt als seine weniger kopflastigen Mitgeschöpfe. Und wie lösen die das Problem? Werfen wir doch einfach einen Blick in den Hühnerstall. Auch Hennen sind nämlich keine Heiligen. Kaum guckt der Gockel mal nicht richtig hin, hat sich die Glucke flugs mit einem anderen vergnügt.

Wie schützt sich der gefiederte Macho also vor Seitenflügen seines Harems? Ganz galant: Er hält seine Hennen bei Laune, indem er sie möglichst oft beglückt. Damit er sich dabei nicht zu sehr verausgabt – die Verschwendung wertvollen Spermas wäre nach biologischer Kosten-Nutzen-Rechnung nicht angeraten –, veranstaltet er meist ein kleines Täuschungsmanöver: Er bespringt die holden Damen nur, aber ejakuliert nicht.

Doch die Betrogenen nehmen den guten Willen offenbar für die Tat. Das haben Wissenschaftler um Tommaso Pizzari von der Universität Oxford und Hanne Lovlie aus Stockholm jetzt bewiesen. Sie verpassten einigen Hennen eine Art Keuschheitsgürtel, mit dem der Hahn sie zwar bespringen, nicht jedoch besamen konnte. Danach testeten sie das Sexualverhalten des weiblichen Federviehs. Und siehe da: Diejenigen Weibchen, die ohne Insemination häufig beglückt wurden, zeigten genauso wenig Interesse am Fremdsex wie ihre Kolleginnen, die in den Genuss des vollen Programms kamen. Vernachlässigte Hühner dagegen warfen gern auch mal ein Auge (oder mehr) auf den Nachbarshahn.

Und was schließen wir daraus, meine Herren? Auch samenloser Sex kann Frauen glücklich machen. Nur auf den Keuschheitsgürtel sollten sie besser verzichten …

Stephanie Hügler

Die Autorin ist freie Journalistin in Heidelberg.

ANZEIGE

NACHGEHAKT

Auf der Spur der verlorenen Illusionen

Stellen Sie sich vor, Ihr Chef hat Sie zu sich gerufen und durchblicken lassen, er wolle Ihnen einen wichtigen Auftrag erteilen. Auf dem Weg zu seinem Büro malen Sie sich aus, dass es bestimmt darum geht, die Firma bei der bevorstehenden Konferenz in Florida zu vertreten. Und wenn Sie schon mal dort sind, können Sie gleich noch ein paar Urlaubstage anhängen. Sie erwachen aus dem Tagtraum, als Ihnen besagter Chef statt eines Flugscheins einen Stapel Aktenordner in die Hand drückt und Sie mit jener falschen Freundlichkeit, die Sie schon immer gehasst haben, darum bittet, diese Vorgänge doch bis Montag zu einem Bericht zusammenzufassen. Sechzig Seiten dürften reichen, meint er noch locker.

Was geht in dieser Situation in Ihrem Hirn vor? Und warum brauchen Sie für den sturzlangweiligen Bericht noch länger als für den vorherigen? Forscher an der medizinischen Universität im japanischen Kioto haben diese eminent wichtigen Fragen jetzt endlich im Tierversuch ergründet *(Science, 17.6.2005, S. 1798)*. Sie brachten Affen bei, auf Kommando jeweils eine von zwei Aufgabenarten zu erledigen. Bei der einen war die Belohnung üppig (viel Wasser), bei der anderen mager (wenig Wasser). Anders als die unzähligen Forscher, die sich schon bis zum Erbrechen mit dem Belohnungssystem des Gehirns beschäftigt haben, interessierten sich die Japaner aber nicht für die Reaktion der Affen auf die großzügige Gratifikation, sondern für ihre Enttäuschung, wenn ihnen der weniger lukrative Job zugeteilt wurde.

Dabei stießen sie auf eine Hirnregion, in der rund die Hälfte aller Nervenzellen aktiv werden, wenn ein Affe sich derart um seine Hoffnungen betrogen sah – ein regelrechtes Enttäuschungszentrum des Gehirns. Eine seiner Aufgaben besteht offenbar darin, den Tatendrang der Tiere zu bremsen. Wenn sie mit der großzügigen Belohnung gerechnet hatten, führten die Affen die gering dotierte Tätigkeit deutlich langsamer und lustloser aus als sonst. Kommt Ihnen das bekannt vor?

Natürlich sollten wir dankbar sein, dass derartige Experimente, die ja letztendlich auf das Verständnis unseres eigenen Denkorgans abzielen, nun der Alltagserfahrung ein großes Stück näher gerückt sind. Schließlich geht es nicht an, dass die Versuchstiere für die einfachsten Verrichtungen immer alle möglichen Leckerbissen bekommen, während beim *Homo sapiens* die undankbaren Aufgaben überwiegen und die Belohnungen meist kleiner ausfallen als erwartet. Auch wenn Tierschützer eine neue Art der Grausamkeit gegen Versuchskaninchen beklagen werden: Die Experimente sind auch nicht grausamer als das ganz normale Berufsleben.

Doch eigentlich interessiert mich etwas anderes noch viel mehr: Wie wirken sich die ständigen Enttäuschungen und herabgestuften Erwartungen langfristig auf das Gehirn aus? Nur den wenigsten von uns fallen ja die großen Belohnungen ständig in den Schoß, für die anderen 99,99 Prozent ist die Desillusionierung das tägliche Brot. Zuerst will man Astronaut oder Filmschauspielerin werden, und dann fristet man sein Dasein als Busfahrer oder Frisörin (auch schöne Berufe, aber im Vergleich ...). Nicht auszudenken, wie viele Neurotransmitter die Nervenzellen im Enttäuschungszentrum abfeuern müssen, bevor sich ein Mensch mit einem solchen Schicksal abfindet.

Deshalb meine Anregung an die Forscher in Kioto: Führt eure Experimente noch viele Jahre fort und seht nach, ob die Abstumpfung, die Hoffnungslosigkeit und der zunehmende Zynismus der ausgebrannten Affen sich nicht in anatomischen Veränderungen im Umfeld des neu entdeckten Zentrums niederschlagen. Nachdem die Signale der Desillusionierung aufgespürt sind, steht die Neurowissenschaft vor der Herausforderung, auch noch den Friedhof der verlorenen Illusionen zu finden.

Michael Groß

www.michaelgross.co.uk

▷ einen Blick auf Titans dunstverhüllte Oberfläche werfen.

Doch auch dieser Blick ist nicht völlig ungetrübt: »Wir haben eine Bildkorrektur vorgenommen, um die restlichen Störungen der Gashülle auszugleichen«, erklärt Planetengeologe Jaumann. »Dadurch konnten wir auch in dem dunklen Gelände, in das die schneckenartige Struktur eingebettet ist, die Topografie enthüllen.« Sie entpuppte sich als eine Art titanisches Mittelgebirge mit Höhendifferenzen von einigen hundert Metern.

Mit der empirischen Atmosphärenkorrektur gelang es den Vims-Forschern zugleich, das Bodenrelief der »Schnecke« selbst zu ermitteln. »Offenbar ist es eine erhabene, kreisförmige Struktur, die in der Mitte eine Vertiefung hat«, meint Jaumann zum Ergebnis der Bildauswertung. Er vermutet, dass sich das Objekt in einer tektonischen Bruchzone befindet. Dort wurde geschmolzenes Material aus dem Untergrund nach oben gedrückt, wo es ausfloss und erstarrte. Im Lauf der Zeit türmte es sich so zu einem »Dom« auf.

In den haarfeinen, dunklen Linien, deren spiralförmiger Verlauf den Eindruck eines Schneckenhauses erweckt, sieht der Berliner Wissenschaftler Gräben oder Rillen, die beim Fließen entstanden sind. Jaumann: »Nur ein vulkanischer Dom mit einer zentralen Caldera, wie wir ihn von der Erde oder vom Mars kennen, kann diese Morphologie plausibel erklären.« Atmosphärische Vorgänge wie Winde oder Verwitterung könnten die eigentümliche Titan-Schnecke schwerlich geformt haben. Dagegen hält es Louise Prockter von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) für denkbar, dass sich das Gebilde bei besserer Auflösung doch noch als Einschlagkrater entpuppt.

Wenn es aber ein Vulkan ist, woraus besteht dann das ausgetretene Material? In Frage kommen Methan, Kohlendioxid, Wasser oder Ammoniak, sei es pur oder als Gemisch. Was die Energiequelle angeht, die für den Aufstieg aus den Tiefen Titans zur Oberfläche sorgt, verweist der Astrophysiker Sotin auf die Gezeitenkräfte, die der Saturn auf seinen Mond ausübt. Mit einer Exzentrizität von drei Prozent ist Titans Umlaufbahn nämlich ungewöhnlich elliptisch. Wegen der schwankenden Distanz zu Saturn wird der Mond wie ein Blasebalg periodisch zusammengedrückt und wieder ge-

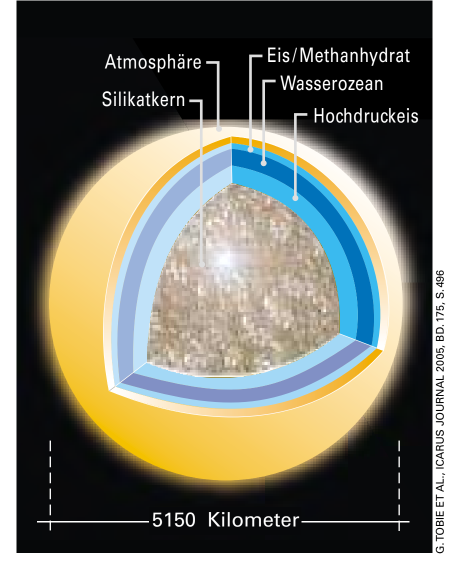
dehnt. Die wechselnde Verformung erzeugt Reibungswärme in seinem Innern. »Dies könnte helfen«, so Sotin, »das gefrorene Material zu schmelzen.« Als Flüssigkeit kann es dann unter der Wirkung von Auftriebskräften durch Risse und Spalten aufsteigen und an der Oberfläche austreten oder verdampfen.

Tiefenmeer mit Gefrierschutz

Einen Hinweis auf die innere Struktur und chemische Zusammensetzung Titans liefert auch eine Modellrechnung, mit der Gabriel Tobie und seine Kollegen in Nantes sowie an der Universität von Arizona in Tucson die Entwicklung des Riesenmonds in den vergangenen 3,5 Milliarden Jahren nachvollzogen haben *(Icarus 6/2005, S. 496)*. Nach diesen Rechnungen verbirgt sich fünfzig bis hundert Kilometer unter der obersten festen Wassereisschicht ein globaler Ozean, wie ihn viele Forscher auch unter der Kruste von Jupiters Europa vermuten. Allerdings soll das Titanmeer deutlich mehr Ammoniak enthalten. Wie ein Frostschutzmittel würde das gelöste Gas den Gefrierpunkt des Wassers herabsetzen, sodass es flüssig bleibt.

Die Modellrechnung berücksichtigt die Wirkung der Gezeitenkräfte Saturns auf die Bahn des Monds und auf die Erzeugung von Reibungswärme in seinem Inneren sowie die Eigenschaften des Wasser-Ammoniak-Phasendiagramms. Ihren Ergebnissen zufolge kann nur ein in der Tiefe verborgenes Meer erklären, dass die Titanbahn immer noch die erstaunlich hohe Exzentrizität von drei Prozent hat. Zu diesem Ozean meint Astrophysiker Tobie: »Ich schätze den Ammoniakgehalt auf rund zehn Prozent, und die Temperatur dürfte heute bei etwas unter –20 Grad Celsius liegen.« Verglichen mit den –180 Grad Celsius an der Huygens-Landestelle kann man das nur als warm bezeichnen. Laut Tobie sei der Ammoniak schon bei der Zusammenballung Titans aus Planetesimalen in den Mond gelangt. Ein Teil des stickstoffhaltigen Gases bildete die ursprüngliche Atmosphäre, aus der die heutige, vom Stickstoff dominierte Gashülle hervorging.

Das Methan darin dürfte geologisch jüngeren Datums sein. Es stammt vermutlich aus so genannten Gashydraten in der obersten Eisschicht. Das sind ungewöhnliche Verbindungen, in denen



Modellrechnungen ergaben diesen mutmaßlichen Aufbau des Saturnmonds Titan. Bemerkenswert ist ein globaler Ozean unter der Oberfläche, der durch gelöstes Ammoniakgas flüssig gehalten wird.

die Wassermoleküle eine Art Käfig bilden, der das Methan einschließt. Bei Wärmezufuhr – wenn etwa an einem Vulkan geschmolzenes Material aufsteigt – zerfallen sie und setzen das Gas frei. So gelangt es in die Atmosphäre und ▷

nimmt, ähnlich dem Wasser auf der Erde, am Wettergeschehen teil.

Ab Februar 2006 wollen Wissenschaftler das Schwerefeld von Titan vermessen, indem sie per Radar Bahnänderungen der Cassini-Sonde bei ihrem Vorbeiflug ermitteln. Die Daten sollten Rückschlüsse auf die Verformbarkeit des Mondinneren erlauben und so Klarheit über die Existenz des geheimnisvollen Tiefenmeers schaffen.

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und Wissenschaftsautor in Berlin.

VERHALTENSFORSCHUNG

Führerpersönlichkeit und Herdentrieb

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Ein Schwarm von Mücken oder Heringen zeigt ein einheitliches Verhalten, obwohl seine Mitglieder sich untereinander kaum verständigen können. Simulationsrechnungen zeigen, wie selbst unter diesen Umständen koordinierte, erfolgreiche Aktionen zu Stande kommen.

Von Christoph Pöppe

Was geht einem Hering durch den Kopf? Nicht viel, denn seine Geistesgaben sind beschränkt. Gehen wir davon aus, dass er seine Schwarmgenossen nicht persönlich kennt und sich mit ihnen bestenfalls minimal verständigen kann. Wenn er nicht sehr viel Erfahrung hat, ist er auch außer Stande, die besten Futterplätze zu finden, es sei denn, der köstliche Duft von Nahrung – ein chemischer Gradient, wie die Biologen sagen – wiese ihm den Weg. Also hilft ihm nichts, als sich an einen erfahrenen Schwarmgenossen zu halten.

Aber woran erkennt man den, wenn man sich keine Fischgesichter merken kann? Vielleicht daran, dass er alt, dick oder aufgeblasen ist – sprich ein eindrucksvolles Imponiergehabe zeigt – oder alles zusammen. Aber diese Autoritätsmerkmale verfehlen ihre Wirkung, wenn man, mitten im Pulk steckend, nicht mehr sieht als die fünf bis sechs unmittelbaren Nachbarn.

Trotzdem gelingt es Schwärmen zusammenzubleiben und genügend Nahrung zu finden – wobei schon das Zusammenbleiben hilfreich für das Überleben ist, weil ein Einzelfisch viel eher gefressen wird als einer in der Meute.

Wie das funktionieren kann, dafür hat eine britisch-amerikanische Forschergruppe jetzt eine plausible Theorie entwickelt. Die Verhaltensbiologen Iain D. Couzin und Simon A. Levin von der Universität Princeton (New Jersey), Jens Krause von der Universität Leeds und Nigel R. Franks von der Universität Bristol untersuchten allerdings nicht echte, sondern im Computer simulierte Schwarmtiere auf ihr Verhalten *(Nature, Bd. 433, S. 513)*. Ihre Ergebnisse sind deshalb nicht nur auf Fische anwendbar, sondern beispielsweise auch auf schwärmende Insekten oder Zebraherden.

Verglichen mit den echten Vorbildern bewegen sich die nachgemachten Tiere etwas ruckelig, wie bei Computersimulationen üblich. Jeder Fisch schwimmt ein Stück, schaut sich um, was die anderen tun, ändert daraufhin seine Richtung, schwimmt wieder ein Stück und so weiter. Was in seine Richtungswahl eingeht, sind

- in erster Linie das Bedürfnis, mit niemandem zusammenzustoßen; wenn diese Bedingung erfüllt ist,
- das Bestreben, im Schwarm zu bleiben und sich der vorherrschenden Schwimmrichtung anzupassen (der »Herdentrieb«);
- Zufallseinflüsse – weil ein Fisch zum Beispiel nicht richtig hinschaut, von einer plötzlichen Strömung erfasst wird oder ein bisschen verspielt ist; und
- bei den wenigen Informierten das Bestreben, der als richtig erkannten Richtung zu folgen.

Schwärme und Herden – gleich ob sie aus Fischen, Zebras oder Mücken bestehen – halten zusammen, weil die große Masse blind einigen wenigen Führern vertraut, die zu wissen glauben, wo es langgeht.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Durch die Wahl verschiedener Parameter können die Forscher die Eigenschaften ihrer Pseudotierchen variieren. So bestimmt ein Faktor namens ω, in welchem Verhältnis ein Fisch seine Überzeugung vom richtigen Weg einerseits und soziale Motive, das heißt die Anpassung an das allgemeine Schwarmverhalten, andererseits in seine Entscheidung eingehen lässt: Je höher der Wert von ω, desto sturer verfolgt er sein Ziel, während $\omega = 0$ die Ahnungslosen ohne Richtungspräferenz kennnzeichnet.

Schwarmverhalten von kleiner Minderheit bestimmt

Wie zahlreiche Simulationsläufe ergaben, reichen schon die genannten Eigenschaften aus, um das Schwarmverhalten zu erklären. Bei geeigneter Wahl der Parameter bleibt der Pulk zusammen und bewegt sich mit ausreichender Genauigkeit in die von den Experimentatoren (willkürlich) als richtig definierte Richtung. Dabei genügt, dass eine Elite von fünf Prozent der Population weiß, wo es langgeht. Bei großen Schwärmen (mehr als hundert Individuen) darf dieser Anteil sogar noch kleiner sein. Ein Informierter muss auch nicht wissen, wie zuverlässig seine Information ist oder ob es außer ihm noch andere gibt, die sich auskennen. Eine Abstimmung findet nicht statt, und sei es in einem noch so übertragenen Sinn; der Konsens bildet sich nur über das Verhalten und dessen Beobachtung durch die Schwarmgenossen.

Spannend wird es, wenn die Informierten sich nicht einig sind. Bei kleinen Differenzen über den richtigen Weg stellt sich eine Kompromisslösung ein; die Allgemeinheit folgt dann einer Route, die einen Mittelwert zwischen den konkurrierenden Richtungen bildet. Sind die Ziele der führenden Persönlichkeiten aber wirklich unvereinbar, bricht der Schwarm entzwei, was im lebenden Vorbild für alle Beteiligten ungünstig ist.

Anhänger eines pessimistischen Menschenbilds finden durch Übertragung dieses Modells auf menschliche Gemeinschaften eine wohlfeile Bestätigung ihrer Überzeugung. Wer den Herdentrieb, dem Couzin und seine Kollegen eine mathematische Form gegeben haben, für die wesentliche Determinante unseres Verhaltens hält, kommt zu erstaunlichen Schlussfolgerungen. Der »Führer«, dem alle Herdenmenschen blindlings hinterherlaufen, muss keineswegs weiser ▷

▷ sein als diese selbst, obgleich die Autoren des Modells ihn durchweg als »Informierten« bezeichnen. Es kommt nicht darauf an, ob er über die Umwelt des Schwarms besser Bescheid weiß oder in ihr erfolgreicher agiert als die anderen, denn die Umwelt geht in das mathematische Modell überhaupt nicht ein. Es ist auch belanglos, ob seine Anhänger ihn als weise oder vorbildlich wahrnehmen, denn nach den Vorgaben des Modells können sie irgendwelche Anzeichen dafür – Alter, weiße Haare, Imponiergehabe – gar nicht sehen. Es ist einzig die Überzeugung des Führers selbst, im Besitz der Wahrheit zu sein, die ihn von allen anderen unterscheidet; und je rücksichtsloser er diese Überzeugung vertritt, desto erfolgreicher setzt er sich gegen Vertreter anderer Ansichten durch, bis hin zur Spaltung der Gemeinschaft.

Allerdings ist diese Übertragung auf unsere Spezies fragwürdig; denn anders als im Modell unterstellt, können Menschen ausgiebig kommunizieren. Außerdem halten die Ergebnisse der Simulation auch für demokratisch gesinnte Gemüter einen Trost bereit: Ein gewisses Maß an Selbstzweifel und Lernfähigkeit auf Seiten der führenden Persönlichkeiten ist gut für das Überleben des Schwarms. In einigen Durchläufen ließen Couzin und seine Kollegen den »Sturheitsfaktor« ω in dem Maße zu- oder abnehmen, wie die für richtig gehaltene Richtung mit der Durchschnittsrichtung des Schwarms übereinstimmt. Wer also bemerkt, dass er als Einziger gegen den Strom schwimmt, wird mit der Zeit etwas unsicherer.

Diese Modifikation des Modells genügte, um eine Mehrheitsentscheidung zu garantieren und die Ansätze jeder Spaltung im Keim zu ersticken: Der Schwarm blieb zusammen und schwamm dorthin, wo die meisten »Informierten« die besten Jagdgründe wähnten – immer noch ohne irgendeine Kommunikation der Mitglieder untereinander.

Zu fragen, ob diese Richtung wirklich die richtige ist, macht keinen Sinn; denn die Umwelt geht, wie gesagt, in die Simulation gar nicht ein. Und so erklärt das Modell auch, wie es kommen kann, dass sich manchmal Herden von Lemmingen einmütig in den Tod stürzen – oder ganze Völker einem verblendeten Führer ins Verderben folgen.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Springers
EINWÜRFE

von Michael Springer

Kardinalsünde

Unheilige Allianz des Heiligen Stuhls mit Kreationisten?

Im schönen Niederösterreich liegt die idyllische Kartause Gaming, Sitz mehrerer Bildungseinrichtungen, die sich der Mehrung des christlichen Glaubens in Amerika und Europa widmen. Neben den Europa-Außenstellen der Franziskanischen Universität von Steubenville (Ohio) und der Ave-Maria-Universität von Naples (Florida) findet sich hier ein Internationales Theologisches Institut für Studien zu Ehe und Familie (ITI), das unter anderem vierwöchige Theologie-Schnupperkurse in englischer Sprache anbietet.

Bisher wirkte diese mit dem Segen des verstorbenen Papstes Johannes Paul II. gegründete Stätte eher im Verborgenen. Doch seit ihr »Kanzler«, der österreichische Kardinal Schönborn, in »New York Times« und »International Herald Tribune« eine Breitseite gegen den Darwinismus abfeuerte, fragen sich Gläubige wie Ungläubige, ob hier ein katholischer Brückenkopf für amerikanische Kreationisten und »Intelligent Design«-Propagandisten etabliert wurde.

Umfragen in den USA zeigen seit einem Jahrzehnt eine stabile Mehrheit von knapp fünfzig Prozent für die kreationistische Aussage »Gott schuf die Menschen mehr oder weniger in ihrer heutigen Gestalt zu einem Zeitpunkt innerhalb der letzten 10000 Jahre«. Hinzu kommen knapp vierzig Prozent für die »Intelligent-Design«-Aussage »Die Menschen haben sich über Millionen Jahre hinweg aus weniger fortgeschrittenen Lebensformen entwickelt, aber Gott lenkte diesen Prozess«. Nur etwas mehr als zehn Prozent – Tendenz leicht steigend – stimmen für »Die Menschen haben sich über Millionen Jahre hinweg aus weniger fortgeschrittenen Lebensformen entwickelt, und Gott hatte an diesem Prozess keinen Anteil«.

In seinem Artikel geißelt der Kardinal dieses »neo-Darwin'sche Dogma« – und verdammt im gleichen Aufwasch die »Multiversum-Hypothese in der Kosmologie«. All dies sei »erfunden worden, um die überwältigende Evidenz für Zweck und Planung (design) in der modernen Naturwissenschaft zu vermeiden«.

Das skurrile Plädoyer für Gott als intelligenten Designer ist kein Zufall. Dem Gaminger ITI gehört auch Mark Ryland als Vorstandsmitglied an, Vizepräsident des Discovery Institute in Seattle, das Intelligent Design propagiert. Schönborns »New York Times«-Artikel wurde durch die Public-Relations-Firma Creative Response Concepts lanciert, die unter anderem das Discovery Institute vertritt.

Nun fragen sich vor allem christlich geprägte Naturforscher entsetzt: Welcher Teufel mag den Kardinal geritten haben, sich mit Intelligent-Design-Sektierern gemein zu machen und mit den Naturwissenschaften anzulegen? Der populistische Appell an die »überwältigende Evidenz für Design in der Biologie« schielt vielleicht auf die erwähnten günstigen Umfrageergebnisse für Kreationismus und Intelligent Design – aber das wäre ziemlich kurzsichtig. Auch für die Meinung, über der ruhenden Erde gehe die Sonne täglich auf und unter, spricht die »überwältigende Evidenz« des Augenscheins, und doch ließ sie sich nicht einmal durch die Androhung von Folter halten.

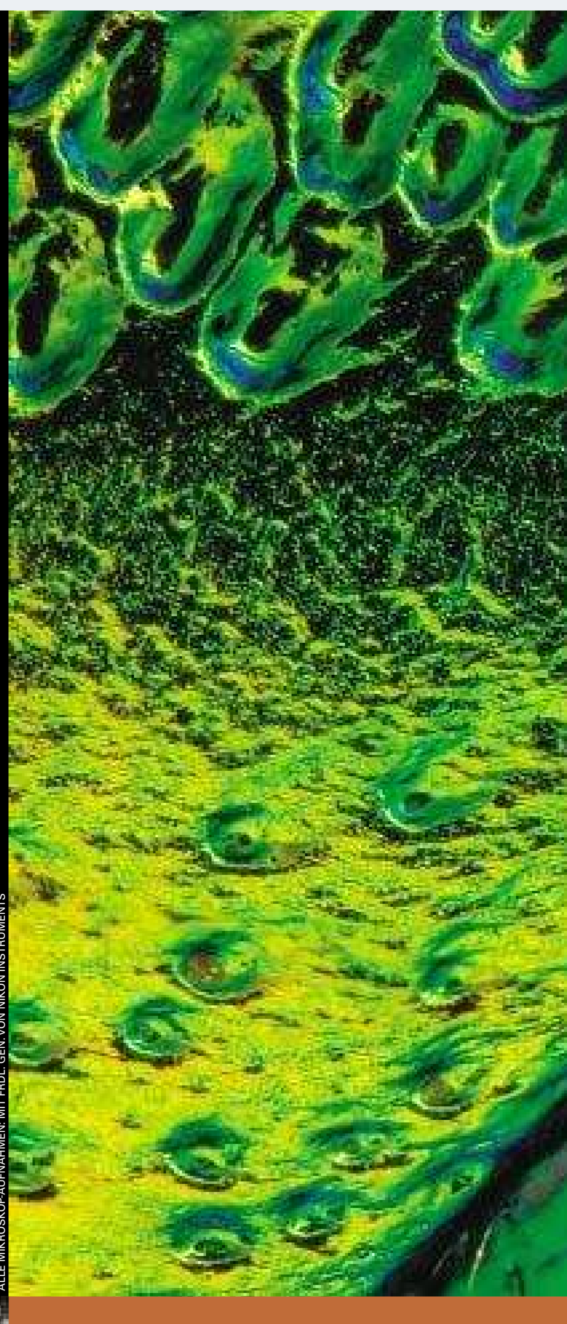
Kurz vor seiner Wahl zum Papst predigte Kardinal Ratzinger im Konklave gegen die »Diktatur des Relativismus« – den modischen Wechsel von Meinungen, das Kommen und Gehen von Sekten. Nun aber relativiert Kardinal Schönborn, offenbar mit dem Segen Benedikts XVI., den Erklärungsanspruch von Darwins Evolutionslehre, indem er sie als Dogma beschimpft und die abstrusen Behauptungen der Intelligent-Design-Sekte verficht. Der Relativismus hat sich mitten im Vatikan eingenistet. Weiche, Satan!



Schönheit unter der Linse

Optische Mikroskopie ist auch heute noch gut für Überraschungen – nicht nur ästhetische.

Text: Emily Harrison

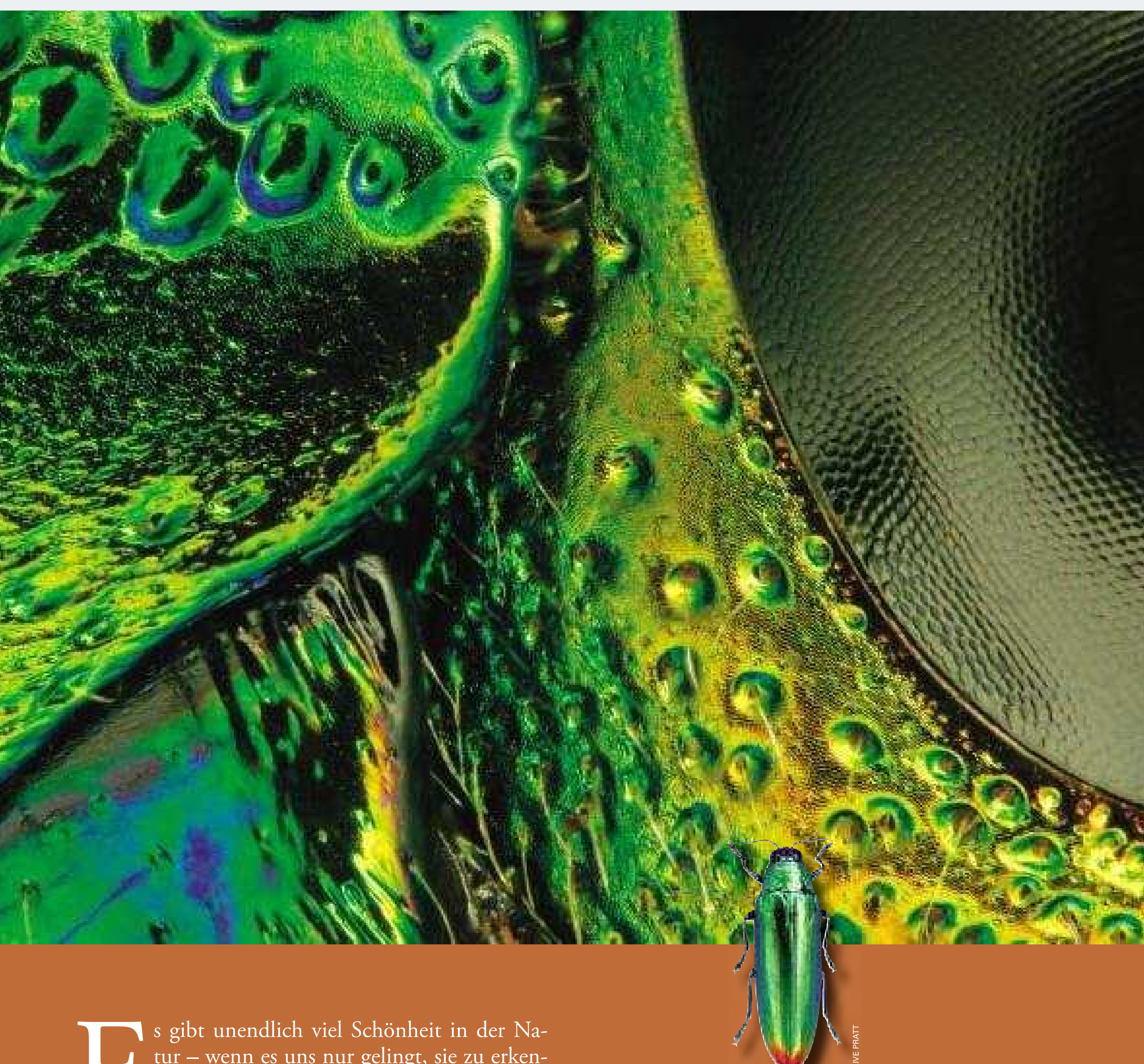


ALLE MIKROSKOP-AUFNAHMEN: MIT FRDL. GEN. VON NIKON INSTRUMENTS

MARK LASKO



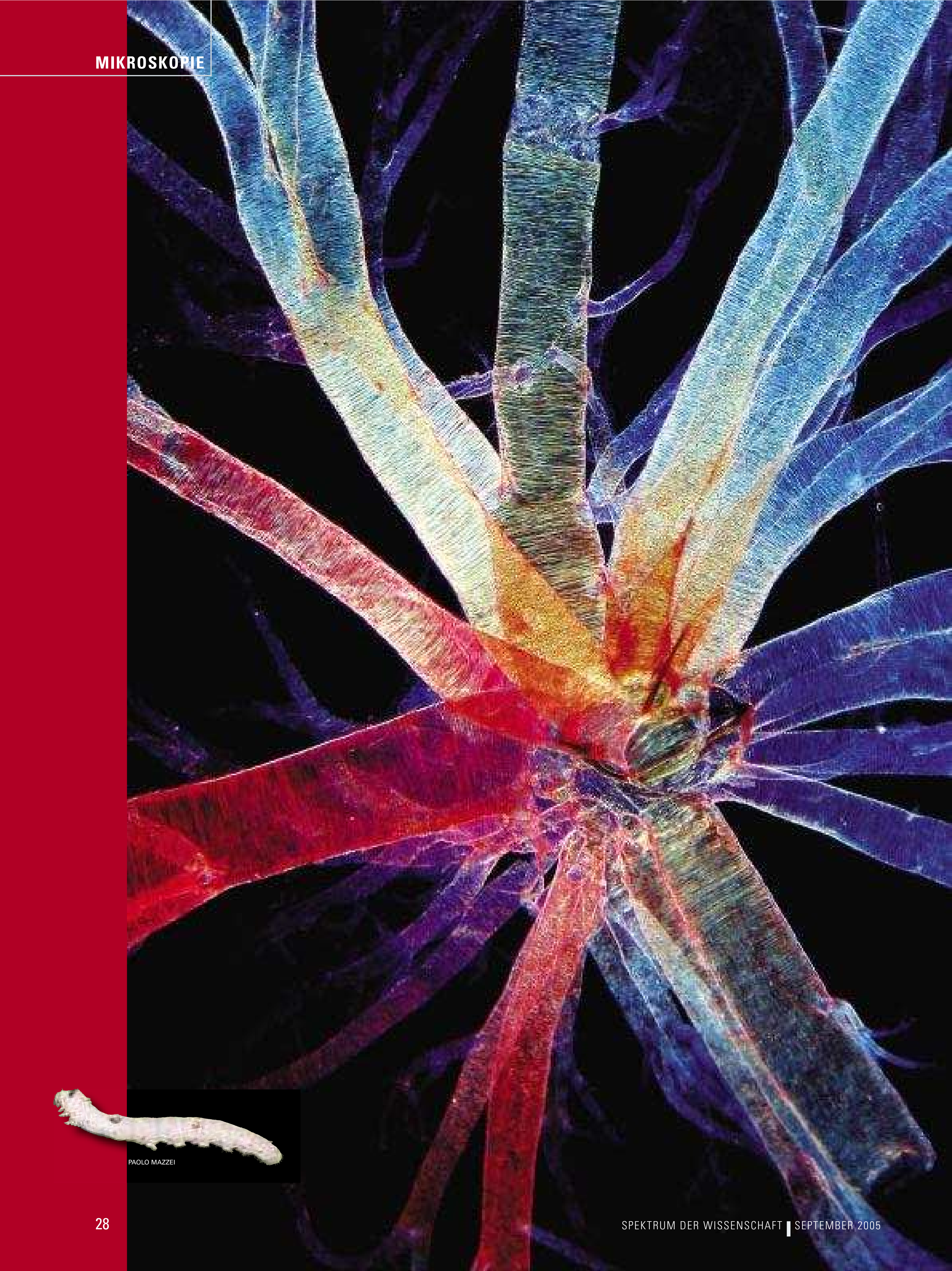
Ein Schwarm von Goldfischen? Ölflecken auf einer Wasserpfütze? Das jedenfalls könnten diese Nahaufnahmen eines Kometenfalters (links) sowie eines Prachtkäfers (rechts) auch darstellen. Der Zoologe Kevin Mackenzie von der schottischen Universität von Aberdeen zeigt in hundertfacher Vergrößerung ein Flügeldetail des Kometenfalters *Argema mittrei,* das er mit Hilfe einer Glasfaseroptik ausgeleuchtet hatte. Charles B. Krebs aus Issaquah im US-Bundesstaat Washington fotografierte im reflektierten Licht ein Stück Körper und Auge des Prachtkäfers *Chrysochroa fulminans* (oben, 40fach).



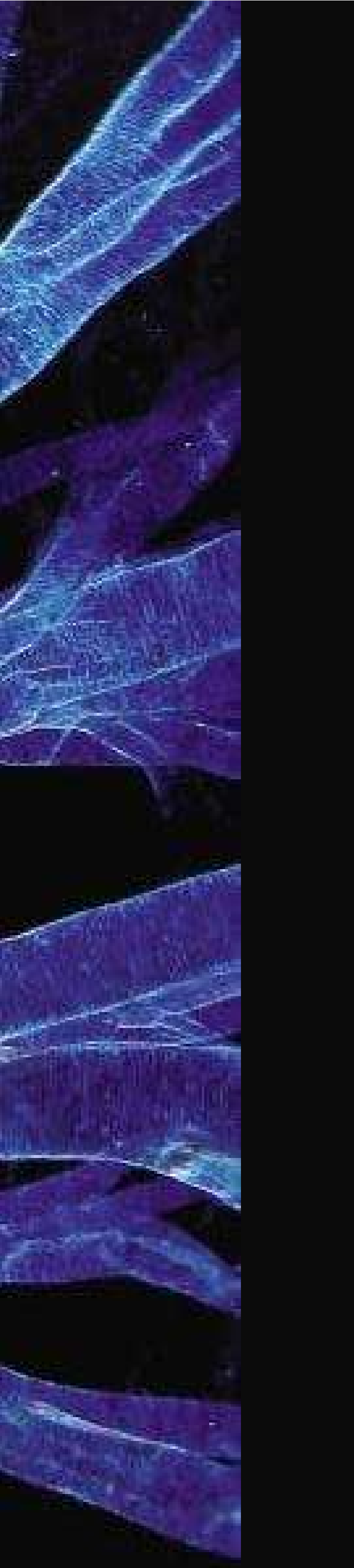
CLIVE PRATT

Es gibt unendlich viel Schönheit in der Natur – wenn es uns nur gelingt, sie zu erkennen. Die Wissenschaft hält einen ganzen Bauchladen neuer Techniken und Geräte bereit, um in der Welt mehr zu sehen als bisher. Allein mit Linsen und Licht ist die Kunst der wissenschaftlichen Beobachtung längst in Dimensionen vorgedrungen, die dem »nackten Auge« niemals zugänglich wären. Während optische Teleskope die Tiefen des Alls bis zu Entfernungen von Milliarden Lichtjahren erschließen, wenden sich optische Mikroskope nach innen. Sie eröffnen einen Zugang zu Innenwelten bis hinein in Dimensionen der Wellenlänge von Licht; das ist tausendmal kleiner als alles, was wir selbst im Meso- oder Makrokosmos wahrnehmen können.

Die hier gezeigten Bilder entstammen Nikons jährlicher »Small World Competition«. Sie zeigen die Kunst, näher zu schauen, wie sie von Künstlern moderner Mikrofotografie heute beherrscht wird. Jede dieser Aufnahmen öffnet uns den Blick auf einen Aspekt des Lebens, den das Auge normalerweise nicht registrieren könnte.



PAOLO MAZZEI



Ian C. Walker aus Huddersfield in England illuminierte Tracheen – Luftkanäle – einer Seidenraupe (links, 70fach). Extravagante Geometrie findet sich selbst bei Würmern. Mit Hilfe der so genannten Dunkelfeldbeleuchtung gelang Greg W. Rouse vom Südaustralischen Museum in Adelaide diese Aufnahme des polygonen Borstenwurms *Myrianida pachycera* (oben, 45fach).



THOMAS G. BARNES



Von Pollen verziert, enthüllt diese Blütenpflanze den Anfang eines neuen Lebenszyklus. Shirley A. Owens von der Staatsuniversität im US-Bundesstaat Michigan hat mit einer konfokalen Lasertechnik die wie Glückskekse geformten Pollen einer Virginischen Dreimastblume *(Trandescantia virginiana)* auf einem Pollensack aufgenommen (links, 1450fach). Der merkwürdige Baum rechts mit den blauen Lämpchen auf zwei Ästen ist in Wahrheit die Narbe eines Löwenzahns (rechts, 160fach), mit Fluoreszenzlicht aufgenommen von Róbert Márkus von der Ungarischen Akademie der Wissenschaften in Szeged.

CHARLIE KANE

Vergrößerung, Auflösung und Kontrast – Eigenschaften, die auch ein Komponist benutzt, um ein dynamisches Musikstück zu kreieren – rücken das Winzige und Transparente in unseren Blick. Um solche zarten Gewebemuster zu visualisieren, färbt der Mikroskopiker Zuckermoleküle ein und versieht Proteine mit verschiedenen Fluoreszenzmarkern. Dann illuminiert er die Proben mit polarisiertem Licht oder bestrahlt sie mit Licht und Lasern aus verschiedenen Richtungen, um spezielle Schatteneffekte zu erzeugen. Jede der so entstandenen Aufnahmen liefert im Erfolgsfall eine kleine Lichtsinfonie – und neue Einblicke. ◁

Emily Harrison ist Bildredakteurin bei Scientific American.


Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Schwarze Löcher im Labor

Astrophysiker kennen sie nur als gigantische Gravitationsfallen in den Tiefen des Alls. Doch bald könnten Schwarze Löcher in irdischen Beschleunigern als flüchtige Quantenobjekte entstehen.

Von Bernard J. Carr und Steven B. Giddings

Seit fast achtzig Jahren verwenden die Physiker Teilchenbeschleuniger, um Atome zu spalten, chemische Elemente umzuwandeln und exotische Teilchen zu erzeugen. Mit ein wenig Glück könnte ihnen demnächst ein Kunststück gelingen, das all diese Errungenschaften in den Schatten stellt: In den mächtigsten Teilchenschleudern werden vielleicht für Sekundenbruchteile Schwarze Löcher auftauchen, die geheimnisvollsten Objekte des Universums.

Bei Schwarzen Löchern denkt man gewöhnlich an massereiche Monster, die ohne Weiteres ganze Sterne verschlingen. Doch die Löcher, die mit den energiereichsten Beschleunigern erzeugt werden könnten – vielleicht schon 2007, wenn der Large Hadron Collider (LHC) am Cern bei Genf in Betrieb geht –, sind nur entfernte Verwandte dieser astrophysikalischen Giganten: mikroskopisch klein, kaum größer als Elementarteilchen. Solche Minilöcher würden zwar weder Sterne zerstören noch ganze Galaxien dominieren oder auch nur unseren Planeten bedrohen, aber in mancher Hinsicht wären ihre Eigenschaften sogar noch dramatischer. Auf Grund von Quanteneffekten müssten sie gleich nach ihrer Entstehung verdampfen und sich in den Detektoren durch charakteristische Teilchenschauer bemerkbar machen. Dabei könnten sie Aufschlüsse über das Gefüge von Raum und Zeit liefern – insbesondere darüber, ob die Raumzeit verborgene höhere Dimensionen enthält.

Die Existenz Schwarzer Löcher folgt aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Demnach wird die Schwerkraft einer immer dichter komprimierten Masse schließlich lokal so stark, dass sie gleichsam in die Raumzeit ein Loch ▷



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Mikroskopisch kleine Schwarze Löcher entstehen vielleicht gelegentlich bei extrem energiereichen Teilchenkollisionen durch kosmische Strahlen in der oberen Atmosphäre. Möglicherweise könnten sie aber auch mit künftigen Beschleunigern erzeugt werden. Die beteiligten Partikel erscheinen als quantenphysikalische Wellenpakete.

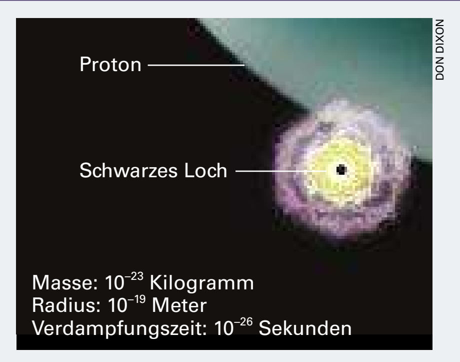
▷ reißt, aus dessen nächster Umgebung nichts mehr zu entkommen vermag. Die Grenze dieses Bereichs heißt Ereignishorizont: Objekte können hineinfallen, kommen aber nie wieder zum Vorschein. Im theoretisch einfachsten Fall – der Raum hat keine verborgenen Dimensionen oder sie sind kleiner als das Schwarze Loch – ist die Größe des Lochs proportional zu seiner Masse. Könnte man die Sonne auf einen Radius von drei Kilometern zusammendrücken, das heißt auf ein Viermillionstel ihrer gegenwärtigen Größe, würde sie sich in ein Schwarzes Loch verwandeln. Um der Erde das gleiche Schicksal zu bereiten, müsste man sie auf neun Millimeter Radius quetschen, ein Milliardstel ihrer gegenwärtigen Größe.

Materie auf engstem Raum zusammengepresst

Je kleiner also das Loch, desto höher die erforderliche Verdichtung. Die Dichte, bis zu der Materie komprimiert werden muss, um unter der eigenen Gravitation zu kollabieren, ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Masse. Für ein Loch mit der Masse unserer Sonne liegt dieser Wert bei 10^{19} Kilogramm pro Kubikmeter – höher als die Dichte eines Atomkerns. Mehr Verdichtung vermag ein Gravitationskollaps im gegenwärtigen Universum nicht zu erreichen. Ein Objekt mit weniger als rund einer Sonnenmasse widersteht dem Kollaps, weil es durch abstoßende Quantenkräfte, die zwischen den subatomaren Teilchen wirken, stabilisiert wird. Astronomischen Beobachtungen zufolge haben die kleinsten Kandidaten für Schwarze Löcher rund sechs Sonnenmassen.

Zweierlei Schwarze Löcher





DON DIXON

Astrophysikalische Schwarze Löcher sind vermutlich Überreste massereicher Sterne, die unter ihrem eigenen Gewicht kollabierten. Wenn Materie hineinstürzt, verhalten sie sich wie kosmische Wasserkraftwerke: Sie setzen Gravitationsenergie frei. Nur diese Kraftquelle vermag die intensiven Röntgenstrahlen und Gas-Jets zu erzeugen, die von Himmelsobjekten wie dem hier gezeigten Röntgen-Doppelstern ausgehen.

Mikroskopische Schwarze Löcher können immerhin die Masse eines großen Asteroiden erreichen. Vielleicht sind solche Gebilde kurz nach dem Urknall durch den Kollaps von Materie entstanden. Falls der Raum verborgene Extradimensionen enthält, könnten Kollisionen energiereicher Teilchen auch im heutigen Universum winzige Schwarze Löcher erzeugen. Diese würden, statt Materie zu verschlingen, Energie abstrahlen und blitzschnell zerfallen.

Doch der Kollaps von Sternen ist nicht der einzige Weg, der zu Schwarzen Löchern führt. Anfang der 1970er Jahre untersuchten Stephen W. Hawking von der Universität Cambridge und einer von uns (Carr) die mögliche Entstehung so genannter primordialer Schwarzer Löcher im frühen Universum. Infolge der kosmischen Expansion nimmt die mittlere Materiedichte fortwährend ab; demnach war sie früher viel höher und überstieg in der ersten tausendstel Sekunde nach dem Urknall sogar die Dichte von Atomkernen. Die uns bekannten physikalischen Gesetze lassen Werte bis zur so genannten Planck-Dichte von 10^{97} Kilogramm pro Kubikmeter zu. Bei dieser Dichte wird die Gravitation so stark, dass quantenmechanische Fluktuationen das Gefüge der Raumzeit aufbrechen. Dabei könnten sich Schwarze Löcher mit einem Durchmesser von nur 10^{-35} Metern (der Planck-Länge) und einer Masse von 10^{-8} Kilogramm (der Planck-Masse) bilden.

Gemäß der herkömmlichen Gravitationstheorie ist dies das kleinstmögliche Schwarze Loch. Es ist viel massereicher als ein Elementarteilchen, aber zugleich viel kleiner. Als die kosmische Dichte weiter fiel, könnten immer schwerere primordiale Löcher entstanden sein. Jedes mit weniger als 10^{12} Kilogramm wäre immer noch kleiner als ein Proton, aber oberhalb dieser Masse wären die Löcher so groß wie vertrautere physikalische Objekte. Löcher, die in der Epoche gebildet wurden, als die kosmische Dichte der Kerndichte entsprach, hätten eine ähnliche Masse wie die Sonne und wären daher astronomische Gebilde.

Die hohen Dichten im frühen Universum waren für die Entstehung primordialer Schwarzer Löcher zwar notwendig, aber keineswegs hinreichend. Damit eine Region zu expandieren auf-

IN KÜRZE

- **Schwarze Löcher** müssen nicht riesige, gefräßige Monster sein. Theoretisch könnten sie in allen Größen vorkommen – sogar **kleiner als subatomare Teilchen**. Winzige Löcher würden durch Quanteneffekte zu Grunde gehen und die allerkleinsten müssten sogar sofort explodieren.
- Schwarze Minilöcher könnten **aus frühen Phasen des Urknalls** übrig geblieben sein. Vielleicht werden Astronomen einige anhand der Gammastrahlung entdecken, die bei ihrer Explosion frei wird.
- Teilchenkollisionen erzeugen möglicherweise auch im heutigen Universum **Schwarze Minilöcher** – sogar auf der Erde. Bis vor Kurzem glaubten die Theoretiker, die erforderlichen Energien seien zu hoch; doch wenn der Raum verborgene Extradimensionen mit passenden Eigenschaften besitzt, liegt die **Energieschwelle viel niedriger**. In diesem Fall könnten Minilöcher durch den Large Hadron Collider bei Cern erzeugt werden oder aber durch Stöße energiereicher kosmischer Strahlen in der oberen Atmosphäre.

hörte und zu einem Schwarzen Loch kollabierte, musste ihre Dichte überdurchschnittlich hoch sein – das heißt, auch Dichtefluktuationen waren nötig. Wie die Astronomen wissen, gab es solche Fluktuationen tatsächlich, zumindest in großem Maßstab; andernfalls hätten sich niemals Strukturen wie Galaxien und Galaxienhaufen gebildet. Für die Entstehung primordialer Schwarzer Löcher müssen diese Schwankungen allerdings in kleineren Maßstäben stärker gewesen sein als in großen; das ist durchaus möglich, aber nicht unvermeidlich.

Selbst ohne Dichtefluktuationen könnten Löcher bei verschiedenen kosmologischen Phasenübergängen spontan entstanden sein – zum Beispiel, als das Universum seine frühe Phase beschleunigter Expansion, die so genannte Inflation, beendete oder als in der Epoche der Kerndichte Protonen und andere Teilchen aus der Suppe der sie bildenden Quarks kondensierten. In der Tat leiten Kosmologen aus der Tatsache, dass nicht zu viel Materie in primordialen Schwarzen Löchern gelandet sein kann, wichtige Bedingungen für Modelle des frühen Universums ab.

Die Erkenntnis, dass Löcher klein sein können, veranlasste Hawking, über daran beteiligte Quanteneffekte nachzudenken, und 1974 zog er den berühmten Schluss, dass Schwarze Löcher Teilchen nicht nur schlucken, sondern auch ausspucken. Hawking zufolge emittiert das Loch thermische Strahlung wie ein Stück heiße Kohle, und zwar mit einer Temperatur, die umgekehrt proportional zu seiner Masse ist. Für ein Loch mit der Masse der Sonne beträgt die Temperatur ein millionstel Kelvin; das ist im heutigen Universum völlig zu vernachlässigen. Aber ein Schwarzes Loch von 10^{12} Kilogramm – der Masse eines Bergs – ist mit 10^{12} Kelvin heiß genug, um sowohl masselose Photonen zu emittieren als auch Partikel mit Masse, beispielsweise Elektronen und Positronen.

Da das emittierende Loch Energie abgibt, sinkt allmählich seine Masse. Darum ist ein Schwarzes Loch extrem instabil. Während es schrumpft, wird es unentwegt heißer, wobei es immer energiereichere Teilchen aussendet und so nur noch schneller schrumpft. Wenn die Masse bis auf etwa tausend Tonnen abgenommen hat, nimmt das Spiel ein abruptes Ende: In Sekundenschnelle explodiert das Loch mit der Energie einer Millionen-Megatonnen-Nuklearbombe. Die Gesamtzeit, die ein Schwarzes Loch zum vollständigen Verdampfen braucht, ist proportional zur dritten Potenz seiner anfänglichen Masse. Die Lebensdauer eines Sonnenmassen-Lochs liegt mit 10^{64} Jahren jenseits aller Beobachtungsgrenzen. Ein Loch von 10^{12} Kilogramm währt 10^{10} Jahre; das entspricht ungefähr dem gegenwärtigen Alter des Universums. Demnach würden etwaige primordiale Löcher dieser Masse ihr Verdampfen gerade jetzt beenden und explodieren. Alle kleineren wären schon in früheren kosmologischen Epochen verdampft.

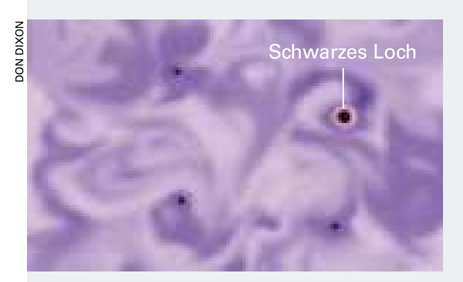
Information auf ewig verloren?

Hawkings Arbeit bedeutete einen gewaltigen konzeptionellen Fortschritt, da sie drei zuvor separate Gebiete der Physik verband: Allgemeine Relativitätstheorie, Quantentheorie und Thermodynamik. Sie war zugleich ein erster Schritt zu einer Quantentheorie der Gravitation. Selbst wenn es primordiale Schwarze Löcher vielleicht niemals wirklich gegeben hat, führte allein schon das Nachdenken darüber zu bemerkenswerten physikalischen Erkenntnissen. Es kann durchaus nützlich sein, etwas zu untersuchen, das am Ende gar nicht existiert.

Insbesondere offenbarte Hawkings Entdeckung ein grundlegendes Paradoxon, das anzeigt, wie schwer es ist, Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik unter einen Hut zu bringen. Gemäß der Relativitätstheorie geht die Information über alles, was in ein Schwarzes Loch fällt, ein für alle Mal verloren. Doch was geschieht mit der im Loch enthaltenen Information, wenn es verdampft? Hawking meinte, Schwarze Löcher müssten letztlich vollständig verschwinden und die geschluckte Information unwiederbringlich zerstören – aber das widerspricht Grundregeln der Quantenmechanik. Das Zerstören der Information verletzt das Gesetz der Energieerhaltung; darum überzeugt dieses Szenario die meisten Physiker nicht.

Eine Alternative wäre, dass Schwarze Löcher Überbleibsel hinterlassen, aber das ist genauso unattraktiv. Damit diese Überreste die gesamte jemals ins Schwarze Loch gelangte Information kodiert in sich bergen, müssten sie in unendlicher Typenvielfalt vorkommen. Die physika- ▷

Drei Arten, ein Miniloch zu erzeugen



DON DIXON

Primordiale Dichteschwankungen
In der Frühzeit des Universums war der Raum von heißem Plasma erfüllt, dessen Dichte von Ort zu Ort schwankte. Wo die relative Dichte hoch genug war, konnte das Plasma vielleicht zu einem Schwarzen Loch kollabieren.



Kosmische Strahlung
Teilchen höchster Energie aus kosmischen Quellen könnten, wenn sie in die Atmosphäre eindringen, durch Kollisionen Schwarze Löcher erzeugen. Deren Explosion ließe sich durch einen Schauer von Strahlung und Sekundärteilchen auf der Erde nachweisen.



Teilchenbeschleuniger
Ein Beschleuniger wie der Large Hadron Collider könnte zwei Teilchen mit so hoher Energie gegeneinander schießen, dass sie zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Detektoren würden den anschließenden Zerfall des Lochs registrieren.

Werden und Vergehen eines Quantenlochs

Entstehung



Masse: 10 TeV

Zeit

0

Unter passenden Bedingungen geht aus der Kollision zweier Teilchen – hier als Wellenpakete dargestellt – ein Schwarzes Loch hervor, das zunächst asymmetrisch ist. Es kann rotieren, vibrieren und elektrisch geladen sein. Die angegebenen Größen sind nur ungefähre Werte. Die Energie von 1 TeV entspricht einer Masse von rund 10^{-24} Kilogramm.

Haarausfall-Phase

Masse: 10 bis 8 TeV

0 bis $1 \cdot 10^{-27}$ Sekunden

Während das Schwarze Loch sich bildet, emittiert es Gravitationswellen und elektromagnetische Wellen. Frei nach dem Physiker John A. Wheeler: Das Loch verliert seine Haare. Es wird zu einem fast eigenschaftslosen Körper, der nur durch Ladung, Drehimpuls und Masse charakterisiert ist. Sogar die Ladung verflüchtigt sich rasch, weil das Loch geladene Teilchen abgibt.

Verlangsamungsphase



Masse: 8 bis 6 TeV

1 bis $3 \cdot 10^{-27}$ Sekunden

Das Schwarze Loch ist nicht schwarz, sondern strahlt. Zunächst gehen die Emissionen auf Kosten des Drehimpulses; das Loch dreht sich immer langsamer und wird kugelsymmetrisch. Die Strahlung tritt größtenteils in der Äquatorebene des Schwarzen Lochs aus.

lischen Gesetze besagen, dass die Produktionsrate eines Teilchens proportional zu der Anzahl seiner Varianten ist. Demzufolge müssten die Überreste des Lochs in unbegrenzter Zahl produziert werden. Sie würden selbst bei so alltäglichen Vorgängen wie dem Anschalten eines Mikrowellenherds entstehen und die Natur wäre auf katastrophale Weise instabil.

Eine dritte Möglichkeit ist, dass das Postulat der Lokalität – räumlich getrennte Ereignisse können einander erst beeinflussen, nachdem das Licht Zeit hatte, von einem zum andern zu gelangen – in diesem Fall versagt. All diese Zwickmühlen beschäftigen die Theoretiker nach wie vor (siehe »Ist das Universum ein Computer?« von Seth Lloyd und Y. Jack Ng, Spektrum der Wissenschaft 1/2005, S. 32).

Der Fortschritt der Physik braucht in der Regel gewisse experimentelle Wegweiser. Die durch Schwarze Minilöcher aufgeworfenen Fragen treiben daher die empirische Suche nach solch exotischen Objekten voran.

Eine Möglichkeit wäre, dass Astronomen primordiale Schwarze Löcher mit einer Anfangsmasse von 10^{12} Kilogramm entdecken, die im gegenwärtigen Universum explodieren. Die Masse dieser Löcher würde größtenteils als Gammastrahlung frei. 1976 erkannten Hawking und Don Page, der damals am California Institute of Technology in Pasadena tätig war, dass Messungen des Gammastrahlungshintergrunds die Anzahl solcher Löcher streng begrenzen. Sie könnten zum Beispiel nicht nennenswert zur Menge der Dunklen Materie im Universum beitragen und ihre Explosionen fänden nur selten so nahe statt, dass sie beobachtbar wären.

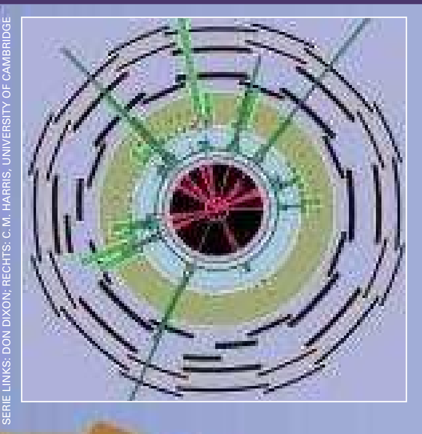
Suche nach verborgenen Löchern

Doch Mitte der 1990er Jahre meinte David Cline von der Universität von Kalifornien in Los Angeles, die kürzesten Gammastrahlungsausbrüche seien vielleicht explodierende primordiale Löcher. Zwar dürften längere Strahlungsausbrüche von zerplatzenden oder verschmelzenden Sternen herrühren, doch die kurzen könnten einen anderen Grund haben. Künftige Beobachtungen werden diese Frage wohl klären; die Idee, mit astronomischen Instrumenten die Endstadien verdampfender Schwarzer Löcher zu erforschen, wirkt jedenfalls verführerisch.

Noch aufregender wäre die Produktion Schwarzer Löcher mit Teilchenbeschleunigern. Wenn es gilt, hohe Dichten zu erreichen, übertrifft kein Gerät Beschleuniger wie den LHC oder das Tevatron am Fermi National Accelerator Laboratory bei Chicago. Diese Maschinen beschleunigen Protonen und andere subatomare Teilchen fast auf Lichtgeschwindigkeit. Die Partikel gewinnen dabei enorme kinetische Energien: Am LHC wird ein Proton eine Energie von rund sieben Teraelektronenvolt (TeV, 10^{12} Elektronenvolt) erreichen. Nach Einsteins berühmter Gleichung $E = mc^2$ entspricht diese Energie einer Masse von 10^{-23} Kilogramm oder der 7000fachen Ruhemasse des Protons. Wenn zwei solche Teilchen zusammenstoßen, konzentriert sich ihre Energie in einem winzigen







SERIE LINKS: DON DIXON; RECHTS: C. M. HARRIS, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Nach dem Verlust des Drehimpulses wird das Loch zu einem noch einfacheren Objekt, das nur noch durch seine Masse charakterisiert ist. Sogar die Masse schwindet langsam in Form von Strahlung und Teilchen, die in alle Richtungen emittiert werden.

Das Loch schrumpft bis auf die Planck-Masse – die nach heutigem Stand der Theorie niedrigstmögliche Masse – und verschwindet ganz und gar. Der Stringtheorie zufolge würde das Loch nun beginnen, Strings zu emittieren, die fundamentalsten Bausteine der Materie.

▲ **Der simulierte Zerfall eines Schwarzen Lochs zeigt einen Teilchenbeschleuniger und mehrere Detektoren im Querschnitt. Vom Zentrum der Beschleunigerröhre (schwarz) gehen Teilchen (rot) aus und werden von Detektoren (konzentrische Farbkreise) registriert.**

Raumbereich. Man könnte erwarten, dass die kollidierenden Teilchen dabei gelegentlich ein Schwarzes Loch bilden.

Allerdings gibt es ein Problem: Eine Masse von 10^{-23} Kilogramm liegt unvorstellbar weit unter dem Planck-Wert von 10^{-8} Kilogramm, der nach der gängigen Gravitationstheorie die kleinstmögliche Masse eines Schwarzen Lochs bildet. Diese untere Grenze folgt aus der Unbestimmtheitsrelation der Quantenmechanik. Weil Teilchen sich mitunter wie Wellen verhalten, sind sie über einen Bereich verschmiert, der mit zunehmender Energie immer kleiner wird – bei LHC-Energien rund 10^{-19} Meter. Dies ist somit der kleinste Bereich, in den die Energie eines Teilchens hineingepackt werden kann. Erreichbar ist damit eine Dichte von 10^{34} Kilogramm pro Kubikmeter. Das ist zwar ziemlich viel, aber nicht genug, um ein Loch zu erzeugen. Damit ein Teilchen dafür sowohl energiereich als auch kompakt genug ist, muss es die Planck-Energie haben, und die liegt um den Faktor 10^{15} jenseits der mit dem LHC erreichbaren Energie.

Doch wie Physiker in den letzten zehn Jahren erkannten, ist die Standardabschätzung der erforderlichen Planck-Dichte möglicherweise zu hoch. Die Stringtheorie – ein prominenter Kandidat für eine Quantentheorie der Gravitation – besagt, dass der Raum mehr als die üblichen drei Dimensionen umfasst. Im Gegensatz zu den anderen Naturkräften sollte die Schwerkraft sich auch in diese Dimensionen erstrecken und infolgedessen auf kürzeste Distanz unerwartet stark anwachsen. In drei Dimensionen vervierfacht sich die Gravitation, wenn man den Abstand zwischen zwei Objekten halbiert; doch in neun Dimensionen würde sie 256-mal so stark. Dieser Effekt kann recht ausgeprägt werden, falls die Extradimensionen des Raums groß genug sind; in den letzten Jahren wurde eingehend danach gesucht (siehe »Die geheimen Wege der Gravitation« von Georgi Dvali, Spektrum der Wissenschaft 7/2004, S. 48). ▷

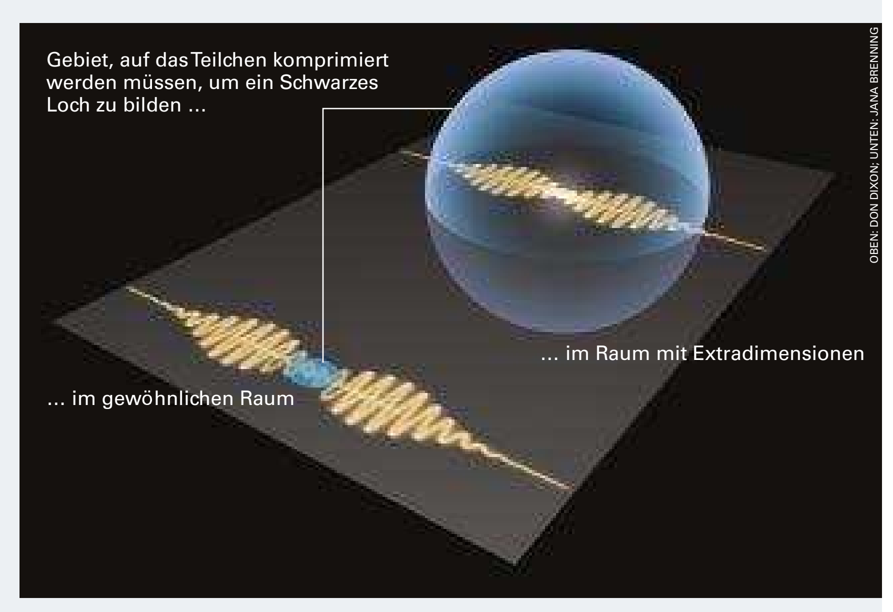


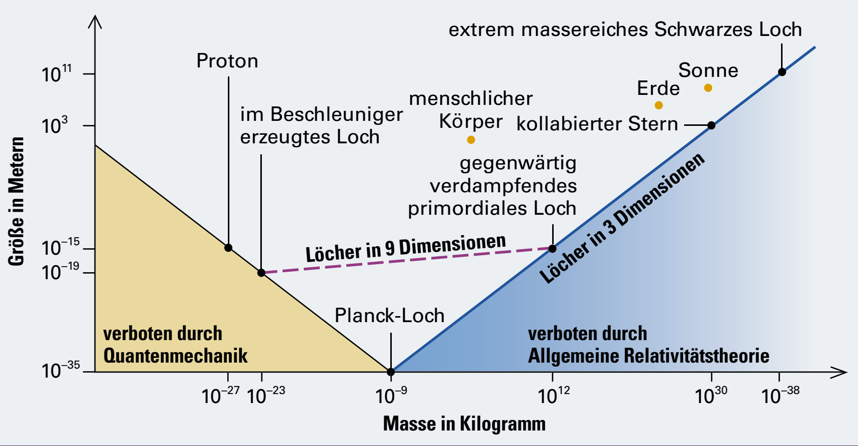
▷ Es gibt außerdem andere Konfigurationen von Extradimensionen, so genannte verzerrte *(warped)* Kompaktifizierungen, die ebenfalls die Schwerkraft verstärken und vielleicht – wenn die Stringtheorie zutrifft – mit noch größerer Wahrscheinlichkeit auftreten.

Falls die Schwerkraft tatsächlich über kurze Distanzen besonders stark wächst, liegt die Energieschwelle, bei der die Gesetze von Gravitation und Quantenmechanik in Konflikt geraten – und Schwarze Löcher erzeugt werden können –, vielleicht viel niedriger als der traditionelle Wert. Obgleich diese Möglichkeit bislang nicht durch experimentelle Ergebnisse gestützt wird, lässt sie doch zahlreiche theoretische Probleme in günstigerem Licht erscheinen. Und falls die Vermutung stimmt, könnte die zum Erzeugen Schwarzer Löcher erforderliche Dichte mit dem LHC erreicht werden.

Löcher sind ein hartes Stück Arbeit

Wie stark muss man ein Stück Materie verdichten, um es in ein Schwarzes Loch zu verwandeln? Je leichter ein Objekt ist, desto stärker muss es komprimiert werden, damit seine eigene Schwerkraft den Kollaps bewirkt. Von dieser Schwelle sind Planeten und Menschen weiter entfernt als Sterne (siehe Diagramm ganz unten). Letztlich widersetzen sich Quanteneffekte der Verdichtung: Teilchen lassen sich nicht auf einen Bereich zusammenquetschen, der kleiner ist als ihre charakteristische Wellenlänge. Demnach dürfte kein Loch kleiner sein als 10^{-8} Kilogramm. Doch falls der Raum verborgene Extradimensionen enthält, wirkt die Gravitation über kurze Entfernungen stärker; entsprechend weniger fest müsste ein Objekt gepresst werden. Darum hoffen die Miniloch-Enthusiasten, vielleicht schon in naher Zukunft Erfolg zu haben.





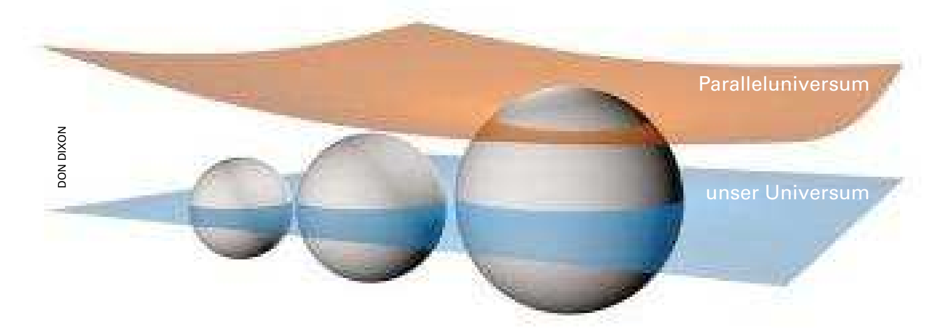
Theoretisch wurde die Produktion Schwarzer Löcher in hochenergetischen Teilchenkollisionen schon Mitte der 1970er Jahre von Roger Penrose an der Universität Oxford untersucht – und dann wieder Anfang der 1990er Jahre durch Peter D'Eath und Philip Norbert Payne, als sie an der Universität Cambridge tätig waren. Die neue Möglichkeit großer Extradimensionen hauchte diesen Forschungen frisches Leben ein und motivierte Tom Banks von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz und der Rutgers Universität sowie Willy Fischler von der Universität von Texas in Austin, das Thema 1999 skizzenhaft zu diskutieren.

Schauer von Schwarzern Löchern in der Erdatmosphäre?

Auf einem Workshop im Jahr 2001 beschrieben zwei Gruppen – einer von uns (Giddings) mit Scott Thomas von der Stanford University sowie Savas Dimopoulos von Stanford und Greg Landsberg von der Brown University – unabhängig voneinander, was man mit Teilchenbeschleunigern wie dem LHC wirklich beobachten würde. Schon nach ein paar Rechnungen waren wir verblüfft. Grob geschätzt könnte unter möglichst optimistischen Annahmen – entsprechend dem niedrigsten plausiblen Wert für die Planck-Energie – eine Produktionsrate von einem Schwarzen Loch pro Sekunde erreicht werden. Ein Beschleuniger, der mit dieser Produktionsrate einen bestimmten Partikeltyp liefert, heißt unter Physikern »Fabrik«. Demnach wäre der LHC eine Fabrik für Schwarze Löcher.

Deren Verdampfen würde in den Detektoren äußerst charakteristische Spuren hinterlassen. Übliche Teilchenkollisionen erzeugen eine überschaubare Anzahl hochenergetischer Partikel, doch ein zerfallendes Schwarzes Lochs verhält sich anders. Nach Hawking strahlt es in alle Richtungen zahlreiche Teilchen mit sehr hohen Energien ab. Unter den Zerfallsprodukten finden sich sämtliche Partikelsorten, die in der Natur vorkommen. Mehrere Teams haben seither immer genauer die auffallenden Anzeichen erforscht, durch die sich Schwarze Löcher in den LHC-Detektoren bemerkbar machen würden.

Die Idee, auf der Erde Schwarze Löcher zu fabrizieren, mag manchem verrückt vorkommen. Wie können wir si-



Mit Schwarzen Löchern unterschiedlicher Größe lassen sich mögliche Extradimensionen des Raumes erkunden. Da die Gravitation – im Unterschied zu den anderen Naturkräften – auch in diese hypothetischen Dimensionen hineinreicht, gilt das auch für Schwarze Löcher. Die Physiker könnten die Lochgröße variieren, indem sie die Teilchenbeschleuniger auf unterschiedliche Kollisionsenergien einstellen. Falls ein Loch ein Paralleluniversum schneidet, zerfällt das Loch schneller und gibt scheinbar weniger Energie ab, weil sie teilweise von dem anderen Universum absorbiert wird.

cher sein, dass die Löcher – wie von Hawking vorhergesagt – harmlos zerfallen? Was, wenn sie immer weiter wachsen und schließlich den ganzen Planeten verschlingen? Auf den ersten Blick scheint diese Sorge nicht unbegründet, vor allem falls manche Details von Hawkings ursprünglicher Argumentation nicht stimmen – insbesondere die Behauptung, in Schwarzen Löchern würde Information zerstört. Doch zum Glück folgt aus allgemeinen quantenmechanischen Überlegungen, dass mikroskopische Schwarze Löcher instabil und daher ungefährlich sind. Konzentrierte Energie in Form von Masse, etwa ein Elementarteilchen, ist nur stabil, wenn ein Erhaltungssatz den Zerfall verbietet; zum Beispiel garantiert die Erhaltung von elektrischer Ladung und Baryonenzahl – sofern sie nicht irgendwie verletzt wird – die Stabilität des Protons. Doch es gibt keinen Erhaltungssatz, der den Zerfall eines kleinen Schwarzen Lochs verbietet. Da in der Quantentheorie alles, was nicht explizit verboten ist, zwangsläufig geschieht, werden Schwarze Minilöcher schnell zerfallen – in Einklang mit dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik.

Übrigens spricht auch ein empirisches Indiz für die Ungefährlichkeit von Miniloch-Fabriken. Hochenergetische Kollisionen wie die im LHC geplanten sind in der Natur bereits vorgekommen – beispielsweise im frühen Universum und sogar gegenwärtig, sobald genügend energiereiche kosmische Strahlen auf unsere Atmosphäre treffen. Wenn bei Kollisionen im LHC Schwarze Löcher entstehen können, dann auch als harmlose Naturvorgänge über unseren Köpfen. Nach ersten Schätzungen von Giddings und Thomas könnten die energiereichsten kosmischen Strahlen – Protonen oder schwerere Atomkerne mit Energien bis zu 10^9 TeV – in der Atmosphäre bis zu hundert Schwarze Löcher pro Jahr erzeugen.

Außerdem haben Giddings und Thomas zusammen mit David Dorfan von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz und Tom Rizzo vom Stanford Linear Accelerator Center – sowie unabhängig davon Jonathan L. Feng von der Universität von Kalifornien in Irvine und Alfred D. Shapere von der Universität von Kentucky – herausgefunden, dass Zusammenstöße mit kosmischen Neutrinos vermutlich noch ergiebiger sind. Falls dem so ist, könnten das neue Auger-Observatorium für kosmische Strahlen in Argentinien, das zurzeit Daten aufnimmt, und das erweiterte Fly's-Eye-Observatorium in Utah mehrere Löcher pro Jahr beobachten. Dennoch würden auch dann Beschleunigerexperimente gebraucht, um Schwarze Löcher zuverlässiger, zahlreicher und unter besser kontrollierten Bedingungen herzustellen.

Das Fabrizieren Schwarzer Löcher würde ein ganz neues Gebiet der Physik erschließen. Schon ihre bloße Existenz wäre ein Beweis für die zuvor verborgenen Raumdimensionen und aus ihren Eigenschaften könnten die Physiker etwas über die Geometrie dieser Dimensionen erfahren. Wenn die Beschleuniger beispielsweise immer massereichere Schwarze Löcher herstellen, dringen diese immer tiefer in die Extradimensionen ein und erreichen vielleicht sogar die Größe einer oder mehrerer dieser Dimensionen; das würde die Abhängigkeit der Lochtemperatur von der Masse merklich beeinflussen. Ebenso könnte ein genügend großes Loch in den Extradimensionen ein dreidimensionales Paralleluniversum schneiden; dann müssten seine Zerfallseigenschaften sich schlagartig ändern.

Mit dem Produzieren von Schwarzen Löchern in Beschleunigern ginge die historische Suche der Menschheit nach letzten Bausteinen der Materie zu Ende. Im vergangenen Jahrhundert sind die Physiker zu immer kleineren Partikeln vorgestoßen – von Staubkörnern über Atome, Protonen und Neutronen zu deren Bestandteilen, den Quarks. Sobald die Forscher Schwarze Löcher erzeugen können, erreichen sie die Planck-Länge, die als die kleinste Längeneinheit überhaupt gilt. Jenseits dieser Grenze verlieren Begriffe wie Raum und Länge wahrscheinlich ihren Sinn. Jeder Versuch, mit Kollisionen höchster Energie noch kleinere Abstände zu erforschen, würde unweigerlich Schwarze Löcher produzieren. Bei immer extremeren Energien würden nicht noch feinere Materiesplitter entstehen, sondern nur größere Löcher. So würde das Auftreten Schwarzer Löcher eine Grenze der Wissenschaft schließen. Dafür entstünde ein neues Forschungsgebiet: die Geometrie der Extradimensionen des Raums. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE




Bernard J. Carr (oben) promovierte in den 1970er Jahren bei Stephen W. Hawking und war einer der Ersten, der kleine Schwarze Löcher theoretisch untersuchte. Heute hat er einen Lehrstuhl an der Queen Mary University of London inne. **Steven B. Giddings** ist Professor an der Universität von Kalifornien in Santa Barbara. Als Experte für Quantengravitation und Kosmologie erforschte er schon früh die Möglichkeit, Schwarze Löcher in Teilchenbeschleunigern zu erzeugen.

Gekrümmter Raum und verbogene Zeit. Einsteins Vermächtnis. Von Kip S. Thorne. Droemer Knaur, München 1994

Black holes at accelerators. Von S. B. Giddings in: The future of theoretical physics and cosmology. Von G. W. Gibbons, E. P. S. Shellard und S. J. Rankin (Hg.). Cambridge University Press, 2003

Primordial black holes. Von Bernard Carr, im selben Buch

High energy colliders as black hole factories: the end of short distance physics. Von Steven B. Giddings und Scott Thomas in: Physical Review D, Bd. 65, Paper Nr. 056010, 2002

Black holes from cosmic rays: probes of extra dimensions and new limits on TeV-scale gravity. Von Luis A. Anchordoqui et al. in: Physical Review D, Bd. 65, Paper Nr. 124027, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

MUNDHARMONIKA

Die Physik des Blues

Was Musiker dem unscheinbaren Instrument an Tönen entlocken, versetzt Akustiker in Staunen.

Von Klaus-Dieter Linsmeier

Zwei Metallplatten mit Schlitzen und Stimmzungen, dazwischen ein Holz- oder Kunststoffkörper, der den Luftstrom kanalisiert, zwei schützende Deckel und fertig ist die Mundharmonika. Ein simples Instrument, kein Vergleich mit dem großen Verwandten Akkordeon. So ist verständlich, dass sich nur selten Wissenschaftler damit befassen, oder?

Dass die Mundharmonika für mehr geeignet ist als für Wanderlieder, beweisen virtuos gespielte Bach-Sonaten, Jazzskalen oder schwermütige Bluesballaden. Und wer ihre physikalische Seite als einfach erachtet, der irrt gewaltig.

Irrtum Nr. 1: Was wir hören, seien die vibrierenden Stimmzungen. Tatsächlich erzeugen deren Schwingungen Luftdruckschwankungen, also Töne, indem sie den durch die Schlitze streichenden »Spielwind« periodisch unterbrechen. Länge, Masse und Steifigkeit einer Zunge bestimmen aber die Frequenz ihrer Schwingung und damit ziemlich genau die der resultierenden Tonstufe.

Irrtum Nr. 2: Hineinblasen in eine »Kanzelle« (siehe große Grafik) erhöht dort den Druck und der lenkt die Stimmzunge aus, beim Ziehen gilt Analoges. Die Wahrheit ist komplexer. Die als Lösabstand bezeichnete geringe Distanz zwischen Metallplatte und Zunge wirkt wie eine Düse: Die Luft wird darin beschleunigt, es entsteht ein Sog, der die Stimmzunge auslenkt. Die resultierende Schwingung würde rasch gedämpft. Doch erneut kommt die Aerodynamik ins Spiel und bringt Druckdifferenzen hervor, die in Richtung des Spielwinds größer ausfallen. So kann die Zunge immer wieder Energie aufnehmen.

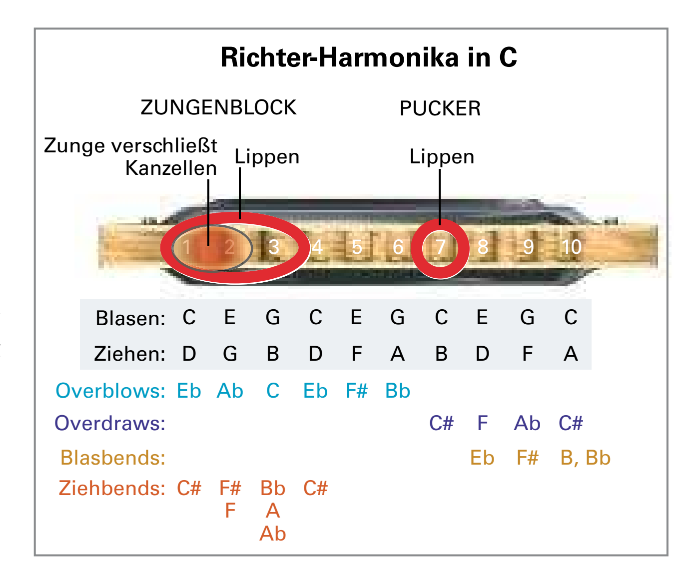
Instrumentenbauer ersannen zwei Grundtypen der Mundharmonika: chromatische und diatonische. Erstere bieten alle zwölf Töne einer chromatischen Tonleiter mit Hilfe eines Schiebers, der den Luftstrom zwischen den entsprechenden Zungen in vier Kanzellen umschaltet. Diese Mundharmonika eignet sich vor allem für das Solospiel, üblich sind drei Oktaven.

Verbreiteter ist die diatonische Variante, die zunächst nur die Grundtöne einer Tonart bietet. Die als Richterstimmung bezeichnete Tonanordnung auf zehn Kanzellen erlaubt mehr Akkorde und prädestiniert dieses Instrument deshalb eigentlich für das Begleitspiel (siehe nebenstehende Grafik). Doch Bluesmusiker entdeckten um 1900 Unglaubliches: Durch eine Veränderung des Mund-Rachen-Raums senkten sie einen Ton um einen, im Extremfall um drei Halbtonschritte. Ihre »Blue notes« eroberten dem Instrument einen neuen Platz als Bluesharp.

Irrtum Nr. 3: Nur wenige Forscher sind diesem Bending genannten Phänomen bislang auf den Grund gegangen. Und sie widerlegten Irrtum Nr. 3, pro Ton schwinge immer nur eine Zunge. Tatsächlich bilden Blas- und Ziehzungen mit der Luftsäule des Mund-Rachen-Raums ein gekoppeltes Schwingungssystem. Beim Blasen wird deshalb auch das Pendant angeregt, allerdings nur schwach (das Gleiche gilt bei Zug). Verändert der Musiker den Mundraum und verlängert durch Zwerchfellatmung die Luftsäule, so verändert er die Resonanzfrequenz des Gesamtsystems. Beiden Zungen wird nun eine Schwingung aufgezwungen: Je niedriger ihre Frequenz, desto stärker ist die tiefer klingende Stimmzunge beteiligt. Im Extrem schwingt diese etwa einen Halbton über ihrer Grundfrequenz und trägt den Hauptteil zum Klang bei.

Neben dem Bending gibt es auch noch ein »Overbending«. Es erzeugt Töne, die etwa einen Halbton höher liegen als zu erwarten. Ein Beispiel: In einer Kanzelle, die auf Blasen G und auf Ziehen A hervorbringt, lässt sich mit »Overblowing« ein B spielen. Experimente zeigen: In diesem Fall schwingt nur die Ziehzunge, bei einem »Overdrawing« die Blaszunge, und das jeweils mit höherer Frequenz. Wieder verändert der Musiker dazu die Resonanzfrequenz des Gesamtsystems durch seinen Mund-Rachen-Raum. Allerdings muss er das schwierige Kunststück fertig bringen, die Stimmzunge, die normalerweise schwingen sollte, nicht anzuregen oder zu stoppen. Sie verschließt dann den Schlitz in der Stimmplatte und der Spielwind sucht sich den Ausgang auf der gegenüberliegenden Seite. Weil dieser Zustand sehr instabil ist, meistern nur wenige Virtuosen diese Technik. ◁

Der Autor dankt der Forschungs- und Entwicklungsabteilung des Trossinger Unternehmens Hohner für fachliche Unterstützung.



Bei der Bluesharp sind die Töne nach der Richterstimmung angeordnet. Nur die mittleren vier Kanzellen liefern eine vollständige Oktave. Durch Veränderung des Mund-Rachen-Raums kann ein Spieler zusätzliche Halbtöne hervorbringen (Bending und Overbending). Um Einzeltöne zu spielen, verschließen Musiker Kanäle mit der Zunge oder formen ihre Lippen wie beim Pfeifen.

WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **In den 1930er Jahren** war Mundharmonikaunterricht Teil des Lehrplans vieler amerikanischer Schulen. Eine Sternstunde im Wortsinn erlebte das Instrument am 16. Dezember 1965, als der Astronaut Walter Schirra an Bord der Gemini 4 »Jingle Bells« spielte. Virtuosen wie Toots Thielemann und Howard Levy machten die Mundharmonika inzwischen vor allem in Jazz und Avantgarde wieder populär.

▶ **Ein Dauerthema in Newsgroups:** die elektrische Verstärkung. Mikrofone müssen den typischen Spieltechniken entgegenkommen, etwa der Dämpfung mit der gewölbten Hand; Verstärker sollten die für Blasinstrumente charakteristischen Obertöne übertragen.

▶ **Das Prinzip der frei schwingenden Stimmzunge** wurde vor etwa 5000 Jahren in China entdeckt. Eines der in Südostasien verbreiteten Instrumente, das Sheng (siehe Bild), gelangte 1776 nach Europa und inspirierte die Instrumentenbauer. Christian Friedrich Buschmann erfand 1821 eine »Mundorgel«, der böhmische Instrumentenbauer Joseph Richter 1825 die Anordnung von zwanzig Tönen auf zehn Kanzellen.

▶ **Overbendings sind extrem schwer** zu spielen. Deshalb hat die diatonische Hohner XB-40 Extrazungen. Sie sind ohne Löseabstand eingebaut und werden durch Kopplung angeregt, wenn die Frequenz der »normalen« Zungen durch einfaches Bending verändert wird.



Urahn Sheng

DEUTSCHES HARMONIKAMUSEUM / FATIMA MAJSOUB

Die Töne auf der chromatischen C-Harmonika

Loch:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Blasen:	C	E	G	C	C	E	G	C	C	E	G	C
Blasen, Schieber gedrückt:	C#	F	G#	C#	C#	F	G#	C#	C#	F	G#	C#
Ziehen:	D	F	A	B	D	F	A	B	D	F	A	B
Ziehen, Schieber gedrückt:	D#	F#	A#	C	D#	F#	A#	C	D#	F#	A#	D

▼ **Der Grundaufbau einer Mundharmonika (hier die diatonische Variante) scheint einfach: Kanzelle, Schlitze und Stimmzungen bilden jeweils die Klang erzeugende Einheit. Die durch Blasen angespielten Stimmzungen sitzen auf der oberen Stimmplatte, die Zugzungen auf der unteren. Die Anordnung wird durch die Deckel geschützt.**

obere Deckplatte
Schraube
obere Stimmplatte
Stimmzunge (Blasen)
Stimmzungenschlitz
Kanzellenkörper
Kanzelle
untere Stimmplatte
Niete
Stimmzunge (Ziehen)
untere Deckplatte

ALLE GRAFIKEN DIESER DOPPELSEITE: SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT




Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Überleben im Kälteschlaf

Schwerverletzte könnten gerettet und Organtransplantate für längere Transporte konserviert werden, ließen sich unsere Lebensfunktionen schadlos zeitweilig aussetzen. Im Tierexperiment kommen Forscher dem schon nahe.

Von Mark B. Roth und Todd G. Nystul

Nicht nur Sciencefiction-Fans sind von der Vorstellung fasziniert, Menschen ließen sich in eine Art konservierenden Dauerschlaf versetzen. Ihre Helden »verschlafen« interstellare Reisen oder irdische Katastrophen für aberhunderte Jahre, ohne dabei zu altern. So spannend diese Geschichten auch sein mögen, so weit hergeholt erscheinen die Voraussetzungen biologisch. Im Alltag sieht es nicht danach aus, als könnten wir an der Geschwindigkeit, mit der sich unser Lebensrad weiterdreht, etwas ändern. Denn ebenso wenig wie das Atmen darf der Betrieb unserer Zellen im Körper länger als einige Minuten stocken, sonst werden lebenswichtige Organe schwer geschädigt.

Die Natur allerdings bietet zahllose Beispiele für Organismen, die ihre essenziellen Lebensfunktionen durchaus reversibel anhalten können – teils sogar über mehrere Jahre. Sie überdauern auf diese Weise ungünstige Umweltbedingungen. Biologen unterscheiden diverse solcher Zustände. Winterschlaf etwa ist nur einer davon. Trotz der Vielfalt eigens geprägter Fachbezeichnungen haben alle Phänomene eines gemein: Sie verkörpern verschiedene Grade von *suspended animation*, ein Schlagwort im englischen Sprachraum. Wörtlich übersetzt bedeutet es »ausgesetzte Belebung«. Dabei sind Produktion und Verbrauch von Energie – somit Stoffwechsel und zelluläre Aktivität des Organismus – drastisch reduziert. Organismen in einem solchen Zustand zeigen sich erstaunlich widerstandsfähig gegen äußere Belastungen wie extreme Temperaturen, Sauerstoffmangel und selbst Verletzungen.

Gelänge es, beim Menschen entsprechende Zustände künstlich herbeizuführen, wäre dies vor allem für die Transplantations- und Notfallmedizin von enormer Bedeutung. Trotz Kühlung und weiterer Maßnahmen beispielsweise versagen empfindliche menschliche Spenderorgane wie das Herz derzeit meist nach mehr als vier Stunden außerhalb des Körpers. Andere wie die Nieren sind gewöhnlich nach mehr als einem Tag Blutleere unbrauchbar (siehe Kasten S. 44). Manchmal müssen daher potenziell passende Empfänger übergangen werden, da der Transport des Organs zu lange dauern würde, um es noch rechtzeitig an den neuen Blutkreislauf anzuschließen. Bei den jährlich Zehntausenden von Organverpflanzungen allein in den USA führt die gebotene Eile gelegentlich auch zu Fehlern, zu denen es unter geringerem Zeitdruck wohl nicht gekommen wäre.

Ließen sich die kostbaren Organe in einen schützenden Zustand ausgesetzter Belebung versetzen, blieben sie vielleicht über Tage oder sogar Wochen haltbar. Auch bei der Versorgung von Schwerverletzten wäre damit entscheidende Zeit

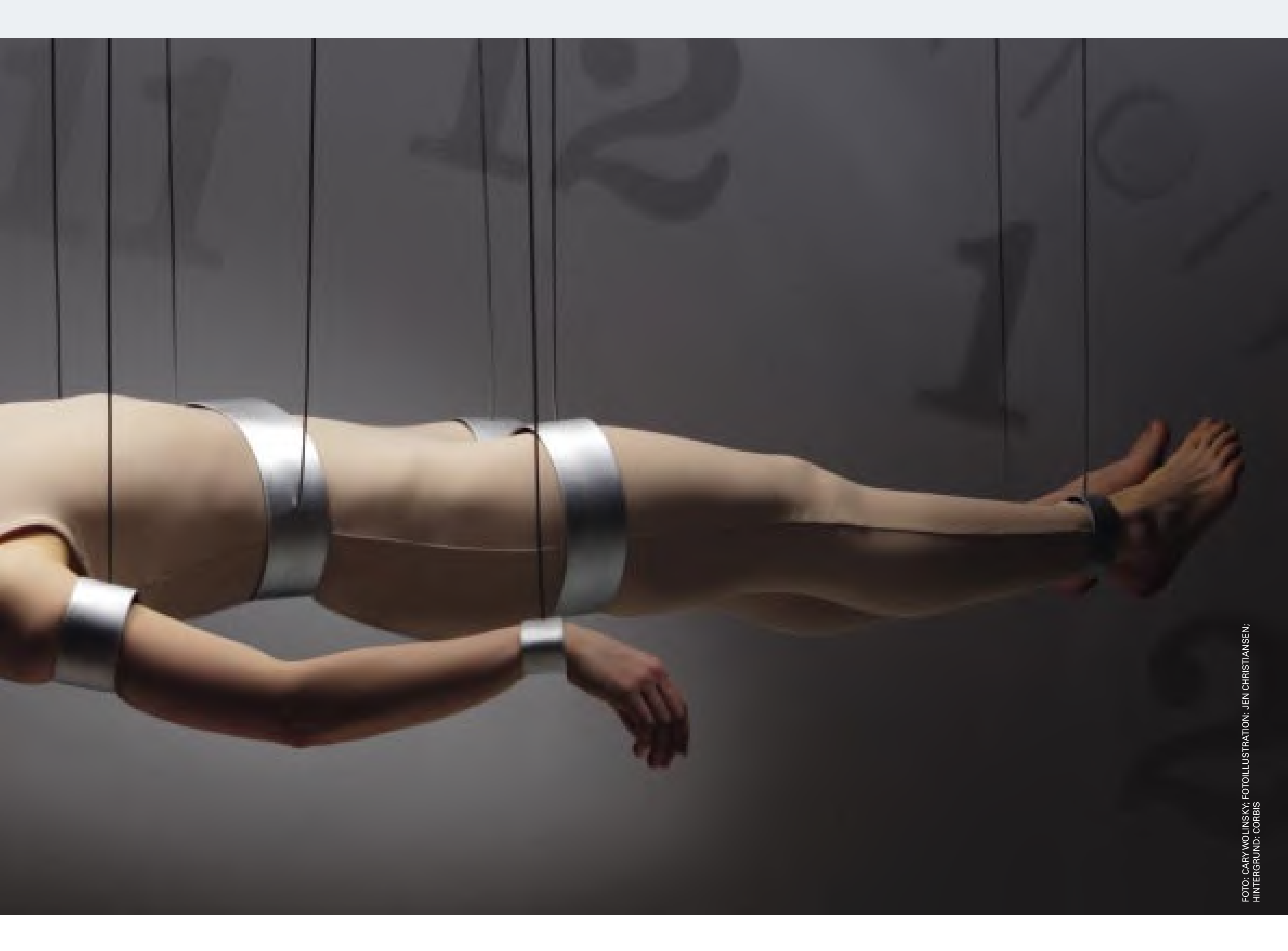


FOTO: CARY WOLINSKY; FOTOILLUSTRATION: JEN CHRISTIANSEN; HINTERGRUND: CORBIS

für lebensrettende Operationen zu gewinnen. Bei starkem Blutverlust kommt es zum Herzstillstand. Den Körper auf extreme Sparflamme zu drosseln, könnte das Absterben von Gewebe verzögern.

Fünf Jahre ohne Sauerstoff

Interessanterweise lässt sich eine Art künstlicher Winterschlaf bei Tieren induzieren, die natürlicherweise keinen halten. Dies ergaben kürzlich Experimente, unter anderem in unserem Labor am Fred-Hutchinson-Krebsforschungszentrum in Seattle (Bundesstaat Washington). Nicht nur das: Im Schutz ausgesetzter Belebung überstehen Tiere offenbar Blutverluste, ohne die üblichen Schäden etwa infolge Sauerstoffmangels zu erleiden. Im Prinzip dürfte es möglich sein, auch Menschen in entsprechende Zustände zu versetzen. Tatsächlich könnte sogar bei vielen Organismen noch latent eine Fähigkeit zum Überdauern vorhanden sein, die auf einem Mechanismus aus den frühen Tagen zellulären Lebens fußt. Darauf lässt der Erfolg unserer speziellen Methoden schließen, die wir bei Labortieren und bei isolierten menschlichen Geweben angewandt haben.

Davon einmal abgesehen sind aus dem gesamten Organismenspektrum Arten und Stadien bekannt, die einige oder sogar die meisten Aktivitäten ihrer Zellen anzuhalten vermögen. Gewöhnlich tun sie dies auf Grund belastender Umweltbedingungen – bis wieder günstigere Verhältnisse herrschen. Ein Pflanzensamen kann so Jahre im Boden ruhen, ehe er auskeimt. Eingekapselte Embryos der Salinenkrebsart *Artemia franciscana* überbrücken bis zu fünf Jahre ohne Nahrung, Wasser oder Sauerstoff. Ihr Trick: ein als Quieszenz bezeichneter Zustand, ähnlich dem ruhender Pflanzensamen, wobei die zelluläre Aktivität praktisch völlig zum Erliegen kommt. In einer wieder zusagenden Umgebung setzen sie ihre Entwicklung normal fort.

Zeitgewinn in medizinischen Notfällen versprechen sich Forscher von einem künstlich eingeleiteten Schwebezustand zwischen Leben und Tod, ähnlich dem Winterschlaf. Dabei verfolgen sie auch paradox erscheinende Strategien.

Als echten Stillstand der Lebensäußerungen werten wir, wenn sich in Zellen unter dem Mikroskop nichts mehr rührt. Bei anderen Formen ausgesetzter Belebung bleiben Zellaktivitäten in stark verlangsamter Form erhalten. Beispielsweise können erwachsene Tiere verschiedener Spezies beim Winterschlaf ihren Bedarf an Nährstoffen und Sauerstoff drastisch reduzieren. Atmung und Herzschlag verlangsamen sich extrem, ihre Körpertemperatur fällt auf Werte nahe dem Gefrierpunkt, und ihre Zellen verbrauchen sehr wenig Energie. Ziesel und Dutzende weiterer kleiner Säugetiere ▷

▷ überwintern in dieser Form. Wieder andere Arten hingegen, darunter manche Frösche, Salamander und Fische, entgehen heißen trockenen Sommermonaten in einem ähnlichen Zustand, einem Sommerschlaf.

Indem diese Tiere Verbrauch und Produktion von Energie drastisch zurückschrauben, kommen sie lange mit wenig Sauerstoff aus. Der Mensch hingegen ist normalerweise auf dessen stete Zufuhr angewiesen, damit die Energieerzeugung seiner Zellen aufrechterhalten wird. Fällt unsere innere Sauerstoffkonzentration unter einen kritischen Level, werden die Zellen geschädigt. Gewebe stirbt in der Folge ab. Häufig ist das die Ursache für den tödlichen Ausgang von Herzinfarkten, Schlaganfällen und Verletzungen, die lebenswichtige Gewebe – und sei es auch nur für kurze Zeit – von der Blut- und damit Sauerstoffversorgung abschneiden.

Noch sind nicht alle molekularen Mechanismen, die in dieser Situation zu den Schäden führen, vollständig zu durchschauen. Sicherlich eine entscheidende Rolle spielt dabei aber, dass eine Zelle wesentliche Funktionen der Selbsterhaltung nicht mehr aufrechterhalten kann. Als Betriebsenergie dient ihr zumeist Adenosintriphosphat (ATP). Die Zelle erzeugt diese Substanz hauptsächlich in eigenen »Kraftwerken«, und zwar durch eine komplexe Reaktionsfolge, die so genannte oxidative Phosphorylierung oder Atmungsketten-Phosphorylierung. Als Prozess, der von Sauerstoff abhängt, verlangsamt er sich bei einem Mangel, und der ATP-Spiegel sinkt. Da das Molekül gewöhnlich innerhalb von Sekunden nach seiner Synthese verbraucht wird, geht den Zellen ohne ausreichende Sauerstoffzufuhr schnell der Treibstoff aus. Und darin liegt vermutlich der Grund für die Schäden in Geweben, die ischämisch, das heißt schlecht oder gar nicht mehr durchblutet sind.

Verschlimmern mag sich das Ganze noch, wenn einige weniger energieintensive, aber nicht minder wichtige Prozesse weiterlaufen. Die Koordination des Gesamtsystems gerät durcheinander. Schließlich kann auch die oxidative Phosphorylierung an sich die Zelle schädigen. Fällt nämlich der Sauerstoffgehalt in den Zellen unter den jeweils optimalen Wert, verliert der Prozess an Effizienz und es können vermehrt bestimmte hochreaktive Nebenprodukte entstehen. Diese so genannten freien Radikale – berüchtigt, weil sie Alterungsprozesse fördern – greifen die Erbsubstanz DNA und andere wichtige Zellbestandteile an. In einem ischämischen und daher sauerstoffarmen Gewebe machen sie der ohnehin stark beeinträchtigten Zelle das Leben noch schwerer.

Ein Wettlauf mit der Zeit

Explantierten Spenderorganen drohen so genannte ischämische Schäden, wenn sie zu lange vom Blutkreislauf abgekoppelt sind. Sie werden zwar mit einer kalten organerhaltenden Lösung durchgespült und auf dem Transport gekühlt, das Zeitfenster – die medizinisch akzeptable kalte Ischämiezeit – ist aber schmal. Laut der Organisation »United Network of Organ Sharing« blieben im letzten Jahr 3216 Spenderorgane ungenutzt, weil nicht rechtzeitig ein passender Empfänger in Reichweite zu finden war.



CARY WOLINSKY

Besser scheintot

Das Ziel einer Herz-Lungen-Wiederbelebung und anderer etablierter Verfahren bei schwerstverletzten Unfallopfern ist es daher, Gewebe schnellstmöglich wieder mit Blut und somit Sauerstoff zu versorgen. Angesichts der strikten Sauerstoffbedürftigkeit unserer Zellen mag dies als einzig möglicher Weg erscheinen, ischämische Schäden zu vermeiden. Tiere im Zustand dramatisch reduzierter Zellaktivität sind jedoch erstaunlich resistent gegen das Problem, wobei der wiederum durch Sauerstoffarmut ausgelöst sein kann. Wäre es denkbar, auch bei Menschen entsprechende schützende Zustände herbeizuführen? Wir wollten daher mehr über den Mechanismus erfahren, der es Organismen erlaubt, ihre Zellfunktionen gerade bei Sauerstoffmangel drastisch einzuschränken.

Wir wählten dazu einige der gängigen biologischen Studienobjekte, wie

IN KÜRZE

- Viele Organismen sind von Natur aus in der Lage, **wesentliche Lebensfunktionen zu verlangsamen oder anzuhalten**. In diesem Zustand überstehen sie ansonsten tödliche Umweltbedingungen wie längere Sauerstoffarmut.
- **Sauerstoffmangel** ist eine der häufigsten Ursachen für das Absterben explantierter Organe sowie für **schwere Schäden und Todesfälle bei Patienten**, die starke Blutverluste oder plötzliche Gefäßverschlüsse erleiden. Nicht immer lässt sich die Versorgung der Gewebe mit Sauerstoff sofort wiederherstellen.
- Das Gegenteil aber, nämlich das **Abblocken allen restlichen Sauerstoffs**, kann zumindest bei verschiedenen Tierarten gerade einen schützenden Zustand »ausgesetzter Belebung« einleiten. Vielleicht gelingt dies auch bei Spenderorganen und Unfallopfern. Bei gesunden Mäusen wurde jüngst solch **eine Art künstlicher Winterschlaf** mit nicht tödlichen Dosen Schwefelwasserstoff eingeleitet, der die Nutzung von Sauerstoff verhindert.

Hefezellen, Zebrafisch-Embryos und Fadenwürmer der Spezies *Caenorhabditis elegans*. Letztere können in jedem Stadium ihres Lebens in einen Überdauerungszustand eintreten, wenn man sie in eine »anoxische« Umgebung versetzt, das heißt in eine Atmosphäre mit höchstens noch etwa 0,001 Prozent Sauerstoff bei Normaldruck. Sie halten das für mindestens 24 Stunden durch.

Völlig anoxische Bedingungen werden allerdings in Geweben des menschlichen Körpers vermutlich nie erreicht, wenn es zu einem Blutverlust oder Gefäßverschluss kommt. Der restliche Sauerstoff im verbliebenen Blut oder im Gewebe selbst könnte die oxidative Phosphorylierung noch auf niedrigem Niveau aufrechterhalten. Die geringe ATP-Produktion würde aber für einen normalen Betrieb nicht mehr ausreichen, und es entstünden auch vermehrt schädliche freie Radikale.

Um diese menschlichen Verhältnisse bei unseren Fadenwurm-Embryos zu imitieren, reduzierten wir die Sauerstoffkonzentrationen auf bloß »hypoxische« 0,01 bis 0,1 Prozent: Das ist etwas höher als unter anoxischen Bedingungen, aber immer noch deutlich niedriger als die »normoxischen« 21 Prozent der normalen Außenluft. In der hypoxischen Atmosphäre gingen die Embryos nicht in den Überdauerungszustand über, sondern versuchten, ihre Entwicklung weiterzuführen, was nach etwa 24 Stunden zu sichtbaren Zellschäden und zum Tod der Tiere führte.

Erhöhten wir die Sauerstoffkonzentration demgegenüber geringfügig – auf 0,5 Prozent –, verlief die Weiterentwicklung normal, als herrschten normoxische Bedingungen. Die Fadenwürmer können also zwar einerseits eine Anoxie durch Eintritt in eine Art scheintoten Zustand überleben und andererseits sich bereits bei Sauerstoffkonzentrationen von nur 0,5 Prozent normal entwickeln – doch der Bereich dazwischen ist für sie tödlich.

Wie unsere Forschungen ferner zeigten, gerät der Embryo nicht etwa passiv in den schützenden Zustand, weil ihm schlicht »die Luft ausgeht«, sondern er scheint aktiv umzuschalten. Wir haben zwei Gene identifiziert, die unter Anoxie – nicht jedoch unter Hypoxie – aktiv sind und offenbar gebraucht werden, um den Teilungs- und Wachstumszyklus der Zellen anzuhalten. Ohne diese Gene waren die Embryos nicht mehr im Stande, die Zellteilung bei einer Anoxie auszusetzen. Ihre Chromosomen verteilten sich nicht korrekt auf die Tochterzellen, und viele Tiere starben ab.

Lebensrettendes Gift

Unsere Ergebnisse deuteten darauf hin, dass ischämische Gewebeschäden offenbar nicht nur – wie es zunächst plausibel erscheint – durch verbesserte Sauerstoffversorgung der Zellen verhindert werden können, sondern auch durch das Gegenteil. Den noch verfügbaren Sauerstoff zu reduzieren steht zwar in offensichtlichem Widerspruch zum üblichen medizinischen Vorgehen, doch könnte das Konzept für den Erhalt menschlicher Gewebe interessante Konsequenzen haben. Ein explantiertes Organ oder die Gewebe von Schwerverletzten ausreichend mit Sauerstoff zu versorgen ist schwierig; Zellen dagegen den Zugriff darauf vorübergehend noch zu erschweren, dürfte zu machen sein.

Eine effektive Möglichkeit bieten Moleküle, die an dieselben Bindungsstellen wie das Vorbild im Zellinneren andocken, sich chemisch jedoch anders verhalten. Kohlenmonoxid zum Beispiel macht Sauerstoff den Platz am Enzym Cytochrom-c-Oxidase – einer Schlüsselkomponente der Atmungskette – streitig, kann jedoch nicht zur ATP-Produktion genutzt werden.

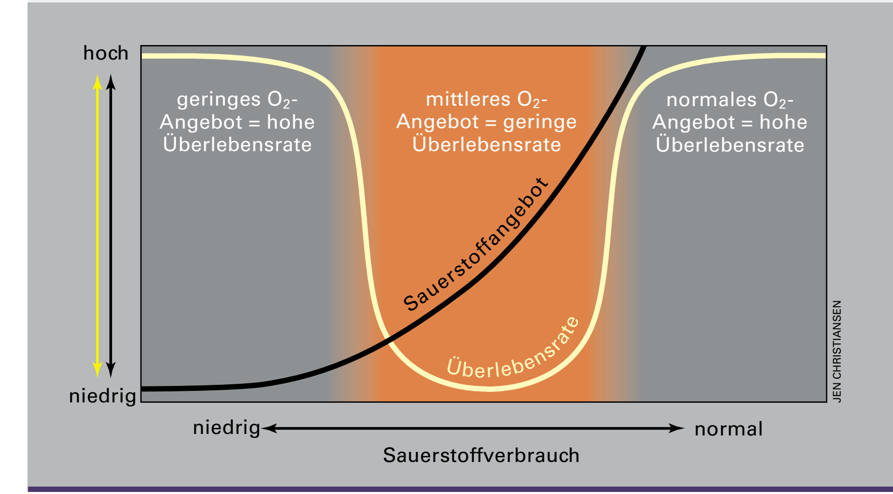
Wir fragten uns daher, ob die Fadenwurm-Embryos vor Gewebeschäden zu bewahren seien, wenn wir der hypoxischen Atmosphäre Kohlenmonoxid zusetzten. Wir würden im Prinzip anoxische Bedingungen simulieren, indem wir den wenigen restlichen Sauerstoff abblockten. Tatsächlich schalteten die Winzlinge unter diesen Bedingungen auf ausgesetzte Belebung um und entgingen den tödlichen Effekten der Hypoxie.

Angesichts dieser ermutigenden Ergebnisse waren wir 2003 begierig, dieses Konzept eingehender zu prüfen. Frühere Studien mit größeren Tieren sowie Berichte über Unfallopfer, die Sauerstoffmangel überlebten, legten nahe, dass der Mechanismus, der unsere Fadenwürmchen vor dem Untergang rettete, auch bei höheren Tieren vorhanden sein dürfte.

Säugetiere im natürlichen Winterschlaf beispielsweise scheinen vor manchen Verletzungsfolgen geschützt zu sein. Kelly Drew vom Institut für arktische ▷

Tödliches Mittelfeld

Die meisten Organismen kommen am besten mit dem normalen Angebot an Sauerstoff (O_2) zurecht. Wie die Autoren und einige andere Forschergruppen entdeckten, können extrem sauerstoffarme Bedingungen Zellen veranlassen, in einen schützenden Überdauerungszustand einzutreten, in dem sie fast keine Energie mehr erzeugen oder verbrauchen. Bei weniger extremem Mangel versuchen die Zellen, ihren Betrieb aufrechtzuerhalten, was zu ineffizienten Aktivitäten und teils selbstzerstörerischen Fehlfunktionen führt. Zu retten wären sie somit theoretisch entweder durch ein wieder normales Angebot oder durch vollständigen Entzug des restlichen Sauerstoffs. Die Autoren versprechen sich davon einen neuen Ansatz, explantierte Spenderorgane einmal länger haltbar zu machen.



Biologie an der Universität von Alaska in Fairbanks führte mit ihren Kollegen feinste Sonden in das Gehirn winterschlafender arktischer Ziesel ein. Im Umfeld der Wunde starb wenig oder gar kein weiteres Hirngewebe ab. Bei aktiven Artgenossen hingegen führte der gleiche Eingriff zum raschen Abbau von Gewebe (siehe Abbildung unten).

Einige Wissenschaftler haben versucht, entsprechende Zustände künstlich bei Tieren einzuleiten, die natürlicherweise keinen Winterschlaf halten. Sie wollten prüfen, ob es möglich ist, die Zellen ohne negative Folgen auf Sparflamme zu setzen und ob diese Maßnahme die Gewebe lange genug schützt, um beispielsweise schwere Blutungen bei Verletzungen stillen zu können.

So arbeiteten Peter Safar und seine Mitarbeiter an der Universität Pittsburgh (Pennsylvania) fast zwei Jahrzehnte lang daran, eine entsprechende Prozedur an Hunden zu optimieren. Safar, der im letzten Jahr starb, gilt als Vater der modernen Wiederbelebung. Im letzten Jahr beschrieb die Gruppe ihre neuesten Experimente zur »ausgesetzten Belebung für spätere Wiederbelebung«. Sie leitete bei 14 Hunden einen Herzstillstand ein und tauschte rasch das gesamte Blut gegen eine kalte Salzlösung aus, die kaum Sauerstoff führt. Dies reduzierte dessen Gehalt im Gewebe drastisch. Die Tiere waren im Prinzip klinisch tot: ohne Bewusstsein, ohne Atmung und ohne Herzschlag. Dieser Zustand ausgesetzter Belebung wurde für 60 Minuten aufrechterhalten.

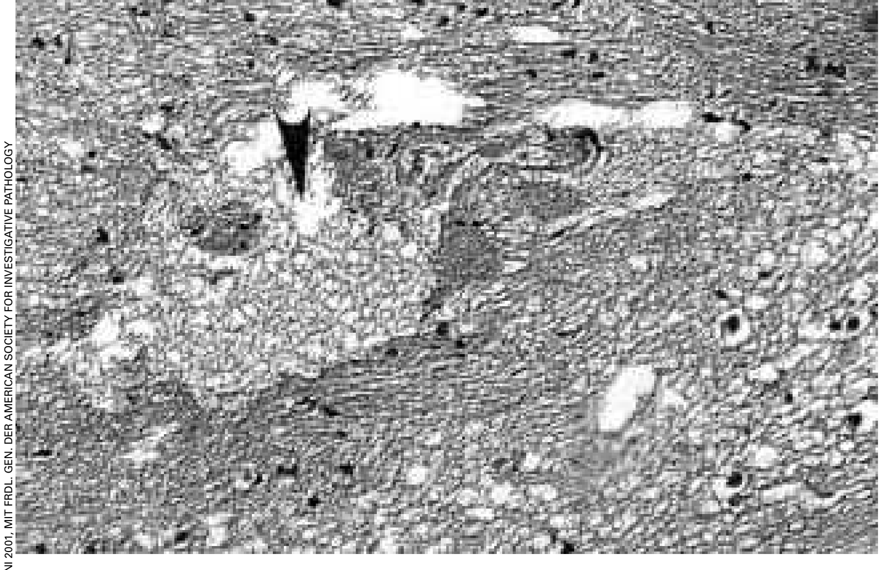
Komplikationsträchtige Manöver

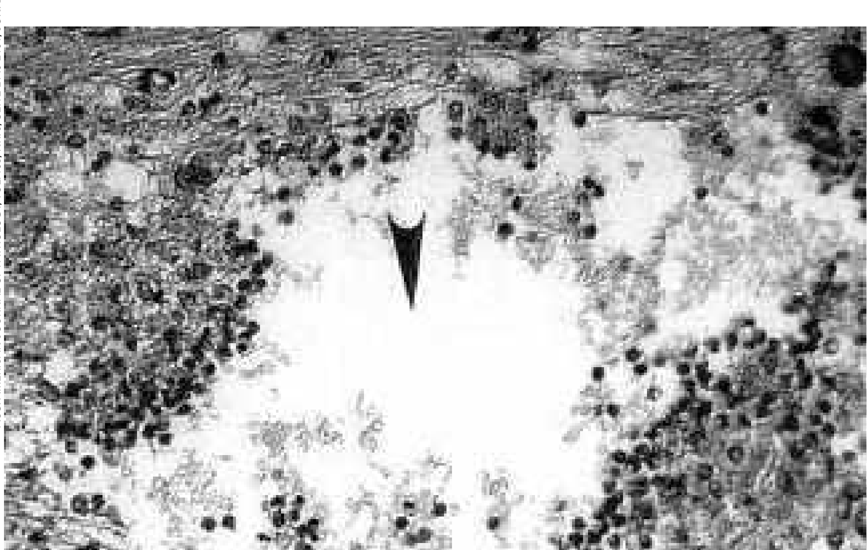
Acht der Hunde bekamen in dieser Phase chirurgisch die Milz entfernt, ein nicht lebenswichtiges Organ. (Eine solche Operation ist beispielsweise nach schweren Unfällen nötig, wenn die Milz gerissen ist und der Patient zu verbluten droht, sodass es zum Herzstillstand kommt.) Danach wurden alle Tiere reanimiert, beginnend mit dem Einleiten von Blut. Drei Tage später waren sie weiterhin am Leben, und keines der Kontrolltiere zeigte funktionelle oder neurologische Schäden. Bei vier der operierten Tiere fanden sich allerdings gewisse neurologische Ausfälle.

Peter Rhee und seine Kollegen von der Militäruniversität für Gesundheitswissenschaften in Bethesda (Maryland) wendeten ein ähnliches Verfahren bei 15 ausgewachsenen Yorkshire-Schweinen an und führten bei einigen reparierende gefäßchirurgische Eingriffe durch. Gedächtnis und Lernvermögen aller Tiere waren danach völlig normal.

In ihren Körperfunktionen ähneln Hunde und Schweine sehr dem Menschen. Daher weckte diese Forschungsrichtung Euphorie, solche Verfahren könnten schon bald perfektioniert und in Notfällen an Unfallopfern, die sonst kaum eine Überlebenschance haben, erprobt werden. Zwar handelt es sich um eine potenziell Erfolg versprechende Methode, doch die vollständige Blutleere ist ein komplikationsträchtiges Manöver, sodass wir nach weniger eingreifenden Möglichkeiten suchten, menschlichen Geweben vorübergehend den Sauerstoff zu entziehen. Ein bereits entnommenes blutleeres Spenderorgan beispielsweise könnte man in einem luftdichten Behälter mit Kohlenmonoxid perfundieren. Es müsste dann vor der Implantation durch Infusion von Blut »wiederbelebt« werden. Wir experimentieren in unserem Labor mit dieser Technik, um zunächst menschliche Gewebeproben vor dem üblichen Zelluntergang zu bewahren.

Mit diesem Ansatz, so glauben wir, ließe sich zwar die Haltbarkeit eines entnommenen Spenderorgans deutlich verlängern. Während hier aber die Effekte von Kohlenmonoxid leicht rückgängig zu machen wären, würde das beim lebenden, nicht blutleeren Körper vermut-





Schutzwirkung natürlichen Winterschlafs: Feine Sonden, nur 0,5 Millimeter dick, wurden in das Gehirn von winterschlafenden und normal aktiven Zieseln vorgeschoben. Drei Tage später zeigte das verletzte Areal unter dem Mikroskop im ersten Fall nur einen feinen Stichkanal, ohne große Schäden oder Entzündungszeichen im Umfeld (oben). Bei den aktiven Erdhörnchen hingegen waren dort viele umgebende Zellen untergegangen (unten). Dunkel gefärbte Immunzellen umringten das Loch.

Heikle Balance des Lebens

Die ersten einzelligen Lebensformen entwickelten sich vor etwa vier Milliarden Jahren, als die Erdatmosphäre noch fast keinen Sauerstoff enthielt, stattdessen vermutlich massenhaft Schwefel und seine Verbindungen. Die frühen bakterienartigen Organismen nutzten das Angebot zur Energiegewinnung.

Selbst im menschlichen Körper wird heute noch Schwefelwasserstoff (H_2S) erzeugt, was zunächst widersinnig erscheint, da die Substanz das Anheften von Sauerstoff an der Cytochrom-c-Oxidase hemmt. (Dies ist das Schlüsselenzym der so genannten Atmungskette, die wiederum mit der Erzeugung der universellen Energiewährung ATP gekoppelt ist.) Möglicherweise hat H_2S eine neue Rolle als unentbehrlicher Antagonist zum Sauerstoff übernommen, als urtümliche Organismen zur Sauerstoffatmung übergingen.

Wenn ein Element (oder eine Substanz) chemisch mit Sauerstoff reagiert, wird es oxidiert und dieser reduziert. Auch wenn ein Molekül, statt Sauerstoff aufzunehmen, Wasserstoff abgibt, sprechen Chemiker von Oxidation – ebenso wenn einem Atom von einem anderen Valenzelektronen entzogen werden, wobei der Empfänger reduziert wird. Auf simultanen Reduktions- und Oxidationsvorgängen, so genannten Redoxprozessen, basiert die Energiegewinnung in allen biologischen Systemen. Viele Lebewesen bevorzugen daher ein Milieu mit dem für sie günstigsten Redoxpotenzial.



I n

nicht durchwirbeltem Meerwasser zum Beispiel, wo sich gelöste Gase hauptsächlich durch Diffusion vermischen, wandert Sauerstoff aus der Photosynthese in den lichtdurchfluteten Schichten tagsüber nach unten, während nachts sein Gradient weniger tief reicht. Gleichzeitig diffundiert aber Schwefelwasserstoff rund um die Uhr nach oben. Erzeugt wird er von Organismen am Boden, die abgesunkenes organisches Material zersetzen. Das Tauziehen zwischen den beiden Gasen, die leicht miteinander reagieren, erzeugt eine chemisch instabile Überschneidungszone, wo Elektronen mit enormer Geschwindigkeit ausgetauscht werden. Eben dieser Gradientenbereich ist der bevorzugte Lebensraum einer Fülle von Organismen, wie dem farblosen Schwefel oxidierenden Bakterium *Beggiatoa alba*, dessen lange Fäden sich gleitend bewegen, sowie vielen Einzellern mit echtem Zellkern. Diese Geschöpfe können in solcher Dichte auftreten, dass sie ausgedehnte Matten bilden, die im Rhythmus des täglichen Sauerstoff-Schwefelwasserstoff-Zyklus aufsteigen und fallen.

Vielleicht verhält sich unser Körper und der anderer Sauerstoff atmender Organismen wie solche Mikrobenmatten, die ihr Redoxgleichgewicht suchen. Nun leben wir aber nicht in der Nähe einer Schwefelwasserstoffquelle und erzeugen deshalb möglicherweise unser eigenes H_2S, damit unsere Zellen in dem optimalen chemisch instabilen Milieu verbleiben, in dem sich ihre Urahnen letztlich entwickelt haben. Ich vermute, dass die Fähigkeit von Schwefelwasserstoff zur Bindung an die Cytochrom-c-Oxidase für einen zellulären Regelkreis genutzt wird, der die oxidative Phosphorylierung in Gegenwart von Sauerstoff bremsen oder ganz abschalten kann. Dieser Mechanismus könnte in zwei Situationen nützlich sein:

- wenn Schäden drohen, weil die Zelle trotz extremer Sauerstoffarmut versucht, Energie zu erzeugen, um den Betrieb aufrechtzuerhalten,
- oder wenn umgekehrt bei einem Überangebot von Sauerstoff die zelleigenen Generatoren heiß zu laufen drohen und die Zelle zu sehr aufheizen können.

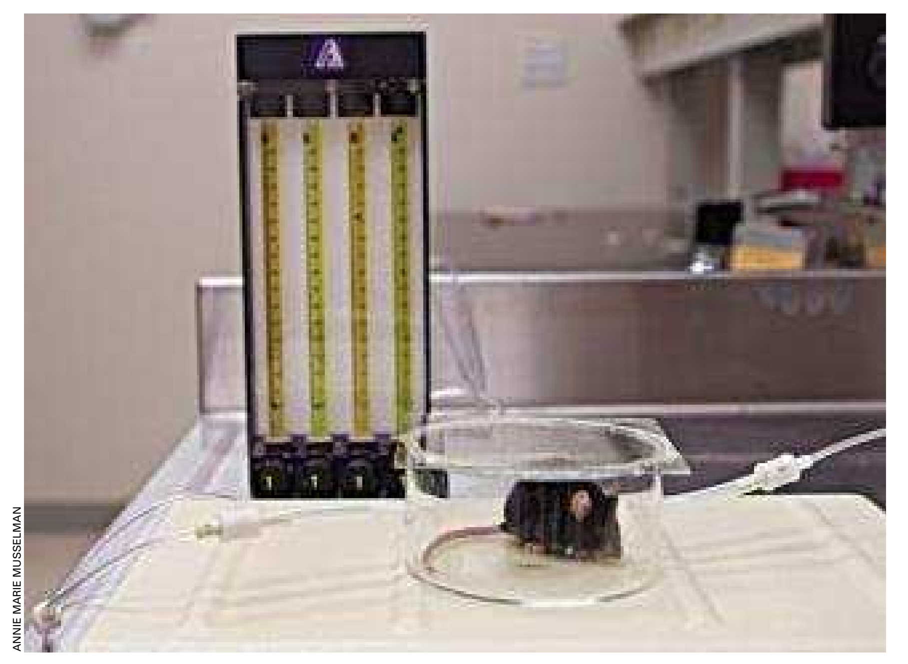
Falls H_2S natürlicherweise zur protektiven Abschaltung, somit als ein Auslöser schützender biologischer Ruhe dient, könnte dies erklären, weshalb wir bei dem Versuch erfolgreich waren, Tiere mit dem Gas in einen künstlichen Winterschlaf zu versetzen.

M. B. Roth

lich anders sein. Kohlenmonoxid ist aus der Bindung an den Sauerstoffträger der roten Blutkörperchen nur schwer zu verdrängen und kommt folglich für Schwerverletzte nicht in Frage. Daher prüften wir weitere Substanzen auf ihre Eignung.

Wie Kohlenmonoxid sind auch die meisten anderen von uns getesteten Wirkstoffe für den Menschen giftig, eben weil sie den Zellen die Sauerstoffnutzung verwehren. Schwefelwasserstoff (H_2S) zum Beispiel ist eine tödliche Gefahr für Arbeiter in Abwasserkanälen oder auf schwefelhaltigen Ölfeldern. Schutzvorschriften legen daher maximale Arbeitsplatzkonzentrationen fest. Die Forschung hierzu stützt sich großenteils auf Studien an Nagern, bei denen Effekte bis zur Letaldosis ermittelt wurden. Diese Daten boten einen guten Anhaltspunkt für unsere ersten Versuche, mit nichttödlichen H_2S-Konzentrationen einen künstlichen Winterschlaf bei Labormäusen zu induzieren.

In einem luftdichten Glasbehälter setzten wir Mäuse einer Atmosphäre aus, die bis zu 80 Teile Schwefelwasserstoff auf eine Million andere Teile enthielt (siehe Foto S. 48). Beim Maximalgehalt fiel der Kohlendioxidausstoß der Tiere – ein Maß für ihre Stoffwechselaktivität – in den ersten fünf Minuten auf ein Drittel des Ausgangswerts, und ihre innere Körpertemperatur sank. Die Mäuse stellten jegliche Bewegungen ein und schienen bewusstlos zu werden. Im Lauf der ▷



ANNIE MARIE MUSSELMAN

Inhalierte nichttödliche Dosen von Schwefelwasserstoff (H_2S) lassen Mäuse der Autoren in eine Art künstlichen Winterschlaf fallen, in dem die Lebensfunktionen drastisch gedrosselt sind. Wie stark und wie schnell das geschieht, hängt von der gewählten Gaskonzentration ab. Bei hohem Gehalt atmen die Tiere dann weniger als 10-mal die Minute statt etwa 120-mal. Sie halten dies bei zusätzlicher Kühlung 6 Stunden ohne erkennbare Schäden aus.

nächsten Stunden ging ihre Stoffwechselrate allmählich auf ein Zehntel des Normalwerts zurück, und sie atmeten nur noch 10-mal statt rund 120-mal pro Minute. Ihre Kerntemperatur fiel schließlich auf etwa 2 Grad über der jeweiligen Umgebungstemperatur ab. Indem wir die Kammer kühlten, konnten wir die Körpertemperatur auf 15 Grad Celsius absenken.

In eiskaltem Wasser überlebt

Die warmblütigen Mäuse waren also durch Inhalation von nichttödlichen Dosen H_2S vorübergehend kaltblütig – korrekter: wechselwarm – geworden, genau wie es bei anderen Arten im Winterschlaf geschieht. Bis zu sechs Stunden beließen wir die Tiere in diesem Zustand. Als wir sie nach dem Aufwachen einer Reihe von Verhaltens- und Funktionstests unterzogen, erschienen alle völlig normal.

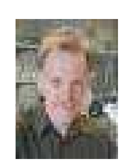
Inzwischen verfolgen wir diesen experimentellen Ansatz bei größeren Säugern weiter. Wir glauben, im Schwefelwasserstoff einen möglichen Schlüssel gefunden zu haben, solche Zustände ausgesetzter Belebung unbedenklich bei Organismen einzuleiten, die natürlicherweise keinen Winterschlaf halten. Der Mensch ist davon nicht ausgenommen. So giftig das Gas auch sein kann – unser Körper stellt es sogar selbst in geringen Mengen her. Möglicherweise hat es in Organismen, die Sauerstoff atmen, eine bisher unerkannte regulatorische Funktion bei der zellulären Energieproduktion – vielleicht ein Erbe aus jener Zeit, als die Atmosphäre unseres jungen Planeten noch wenig Sauerstoff enthielt (siehe Kasten S. 47). Allerdings bleiben noch viele Fragen zu klären, bevor eine H_2S-induzierte ausgesetzte Belebung beim Menschen versucht werden kann.

Das größte Fragezeichen bleibt, ob Menschen überhaupt in eine Art künstlichen Winterschlaf versetzt werden können. Zumindest überleben sie unter besonderen Umständen manchmal mehrere Stunden ohne Sauerstoff. Dafür sprechen überzeugende Indizien. Ein bemerkenswertes Beispiel ist der Fall einer Tourenskiläuferin, die wiederbelebt wurde, nachdem sie mehr als eine Stunde vollständig in eiskaltem Wasser gelegen hatte. Als die Rettungsmannschaft sie fand, war die Frau klinisch tot. Atmung und Herz standen still, ihre Körperkerntemperatur lag bei 14 Grad Celsius. Obwohl die Reanimation ganze neun Stunden dauerte, überlebte sie und erholte sich nach Angaben ihrer Ärzte »hervorragend«.

Beat H. Walpoth von der Universität Bern analysierte weitere 32 Fälle von Unfallopfern, deren Körpertemperatur zum Zeitpunkt der Bergung auf 17 bis 25 Grad gefallen war und die oft keine Vitalfunktionen mehr zeigten. Annähernd jeder Zweite überlebte ohne Langzeitfolgen. Da die Unfallopfer bei ihrer Bergung nicht mehr atmeten, muss der Sauerstoffgehalt ihrer Gewebe sehr niedrig gewesen sein.

Wenn menschliche Zellen, wie daraus zu schließen ist, gelegentlich noch flexibel genug reagieren und unter extremer Belastung ihre Aktivitäten vorübergehend verlangsamen oder einstellen – welche Bedingungen sind dies dann genau? Welche Faktoren entscheiden darüber, dass manche Opfer so etwas überleben und andere nicht? Welche Verbindungen bestehen zwischen natürlichen und künstlichen Überdauerungszuständen bei Tieren und dem bislang kaum erklärbaren Überleben unterkühlter Unfallopfer? Vielleicht offenbart sich bei all dem, dass uns die Fähigkeit zum Übergang in einen schützenden Zustand natürlicherweise noch zu eigen ist. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Mark B. Roth (oben) vom Fred-Hutchinson-Krebsforschungszentrum in Seattle beschäftigt sich mit diversen zellulären Grundprozessen. **Todd G. Nystul** erforschte die Effekte der ausgesetzten Belebung, als er Doktorand bei Roth war. Seit seiner Promotion 2004 untersucht er als Postdoc an der Carnegie Institution in Washington die Regulation von Stammzellen bei Taufliegen. Von den Mechanismen ausgesetzter Belebung erhoffen sich beide Aufschluss, wie solche Zellen lange ruhen können und wie manche auf Sparflamme lebenden Krebszellen strahlenresistent werden.

Hydrogen sulfide induces suspended animation-like state in mice. Von E. Blackstone et al. in: Science Bd. 308, S. 518, 22. April 2005

Carbon monoxide-induced suspended animation protects against hypoxic damage in Caenorhabditis elegans. Von T. G. Nystul und M. B. Roth in: Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Bd. 101, Heft 24, S. 9133, 15. Juni 2004

Suspended animation can allow survival without brain damage after traumatic exsanguination cardiac arrest of 60 minutes in dogs. Von A. Nozari et al. in: Journal of Trauma, Bd. 57, Heft 6, S. 1266, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Handscheinwerfer als Fernbedienung

»Eine drahtlose Fernsteuerung für Fernsehempfänger hat eine große amerikanische Firma entwickelt. In den 4 Ecken des Bildrahmens sind 4 Photozellen angebracht. Wird die eine davon mit einem kleinen Handscheinwerfer angestrahlt, so wird das Gerät ein- oder ausgeschaltet; zwei andere Zellen dienen zum Abstimmen, die 4. dazu, den Ton auszuschalten, während das Bild erhalten bleibt, um nicht langweilige Werbesendungen hören zu müssen.« *(Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. 7, Heft 9, S. 328, September 1955)*

Blaue Elektronendiamanten

»Vor einiger Zeit wurde beobachtet, daß bisher farblose, natürliche Diamanten sich unter Einwirkung von Neutronen-Bestrahlung grün färben. Nunmehr ist es auch gelungen, die in der Natur vorkommenden blauen Diamanten künstlich aus farblosen natürlichen Steinen zu erzeugen, indem letztere einem Elektronenbeschuß ausgesetzt werden … Die Färbung der ›atomphysikalisch‹ erzeugten blauen Edelsteine gleicht völlig der der natürlich vorkommenden blauen Diamanten, so daß anzunehmen ist, daß diese unter Bedingungen entstanden, die denen des künstlichen Elektronenbeschusses entsprechen.« *(Chemiker-Zeitung, 79. Jg., Nr. 17, S. 614, September 1955)*


Die Benzin-Hydranten und Gerätewagen beschleunigen das Betanken der Flugzeuge.

Benzin-Hydrant am Flughafen

»Normalerweise erhalten Flugzeuge aus Tankwagen das für den Flug notwendige Benzin. Das kann aber bei starkem Verkehr und hohem Treibstoffbedarf zu unliebsamen Verzögerungen führen … Deshalb wurde kürzlich auf dem Flughafen Echterdingen (Stuttgart) eine Flugbenzin-Hydrantanlage gebaut. Die Tanks … liegen außerhalb des Flugfeldes. Durch Rohrleitungen wird das Benzin … zu mehreren Hydranten gefördert … An diese wird bei Bedarf ein Gerätewagen angeschlossen … Während bisher bei den … Tankwagen 200 bis 250 l/min Förderleistung angegeben wurden, erreicht die neue Anlage 700 l/min.« *(Umschau, 55. Jg., Heft 17, S. 538, September 1955)*

Federnde Wagenräder

»Die Erfindung eines Ersatzes für den Pneumatic würde … die Verbilligung des Automobils bedeuten. Aber auch die Sicherheit würde erheblich steigen, wenn der leicht verletzliche Luftreifen in Wegfall käme … Bei der patentierten Erfindung von Dr. Borchers werden bei Anwendung von auf Zug beanspruchten, zwischen zwei konzentrischen Radkränzen ausgespannten Federn diese an den Befestigungsstellen an beiden Radkränzen gelenkig, und zwar durch in zwei Ebenen bewegliche Universalgelenke befestigt, so dass die Verschiebung der beiden Radkränze gegen einander von oben nach unten unter dem Druck der Belastung … ermöglicht wird.« *(Die Umschau, 9. Jg., Nr. 40, S. 795, September 1905)*


Die federnden Räder fangen Stöße so gut auf, dass die Insassen nicht durchgeschüttelt werden.



Herztransplantation bei Hunden

»Zwei Doktoren, Gutherie und Tarrell, haben unter den Auspizien der Universität Chicago Versuche angestellt, das Herz zu ersetzen. Die Experimente wurden an Hunden vorgenommen; welches Ziel sie damit verfolgen, darüber äußerte sich Dr. Tarrell folgendermaßen: ›Unsere Erfahrungen berechtigen uns zu der Hoffnung, daß wir eines Tages ein verwundetes oder verbrauchtes Herz in einem menschlichen Wesen durch ein jugendliches, kräftiges Herz eines lebenden Affen ersetzen können. Die Arbeit steckt noch in den Anfängen. Sie wird aber von anderen fortgeführt werden, bis schließlich ein dauernder Gewinn für die Menschheit daraus erwächst.‹« *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 213, S. 520, September 1905)*

Von der Größe und Schnelligkeit der Regentropfen

»Die ganz kleinen Regentropfen fallen relativ langsam und ihre Schnelligkeit nimmt mit der Größe rasch und bedeutend zu … Es fand sich das interessante Resultat, daß nicht alle möglichen Größen von Tropfen sich regellos in der gleichzeitig fallenden Regenmenge finden, sondern daß, wenn man von der kleinsten und häufigsten Tropfengröße ausgeht, alle jene Tropfengrößen besonders häufig vorkommen, deren Gewicht das Doppelte, Vierfache, Achtfache usw. … dieser kleinsten Tropfen beträgt.« *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 220, S. 575, September 1905)*

Geheimnisvoller Geodynamo

Warum kippt das Magnetfeld der Erde im Lauf der Äonen immer wieder zwischen zwei Orientierungen hin und her? Neuere Erkenntnisse zeigen, dass die nächste Polumkehr bereits begonnen haben könnte.

Von Gary A. Glatzmaier und Peter Olson

Unserer Erfahrung nach zeigt eine Kompassnadel stets nach Norden. Seit Jahrtausenden nutzen Seeleute diese Eigenschaft zur Navigation. Noch wesentlich länger orientieren sich Vögel und andere Tiere mit Magnetsinn am irdischen Magnetfeld. Da mag es seltsam anmuten, dass die magnetischen Pole der Erde ihre Lage gelegentlich vertauschen.

Wie eisenhaltige Vulkangesteine zeigen, die beim Erstarren die Orientierung des Erdmagnetfelds zur jeweiligen Zeit speichern, polte sich das Feld in der 4,5 Milliarden Jahre langen Geschichte unseres Planeten mehrere hundert Male um – im Mittel alle 250 000 Jahre. Der letzte Polaritätswechsel liegt allerdings bereits 780 000 Jahre zurück. Auffällig ist des Weiteren, dass das Magnetfeld seit der ersten Vermessung in den 1830er Jahren um fast zehn Prozent schwächer geworden ist. Selbst wenn das Feld seine Energiequelle komplett verloren hätte, sollte eine derart starke Abnahme zwanzigmal länger dauern. Steht vielleicht eine weitere Feldumkehr unmittelbar bevor?

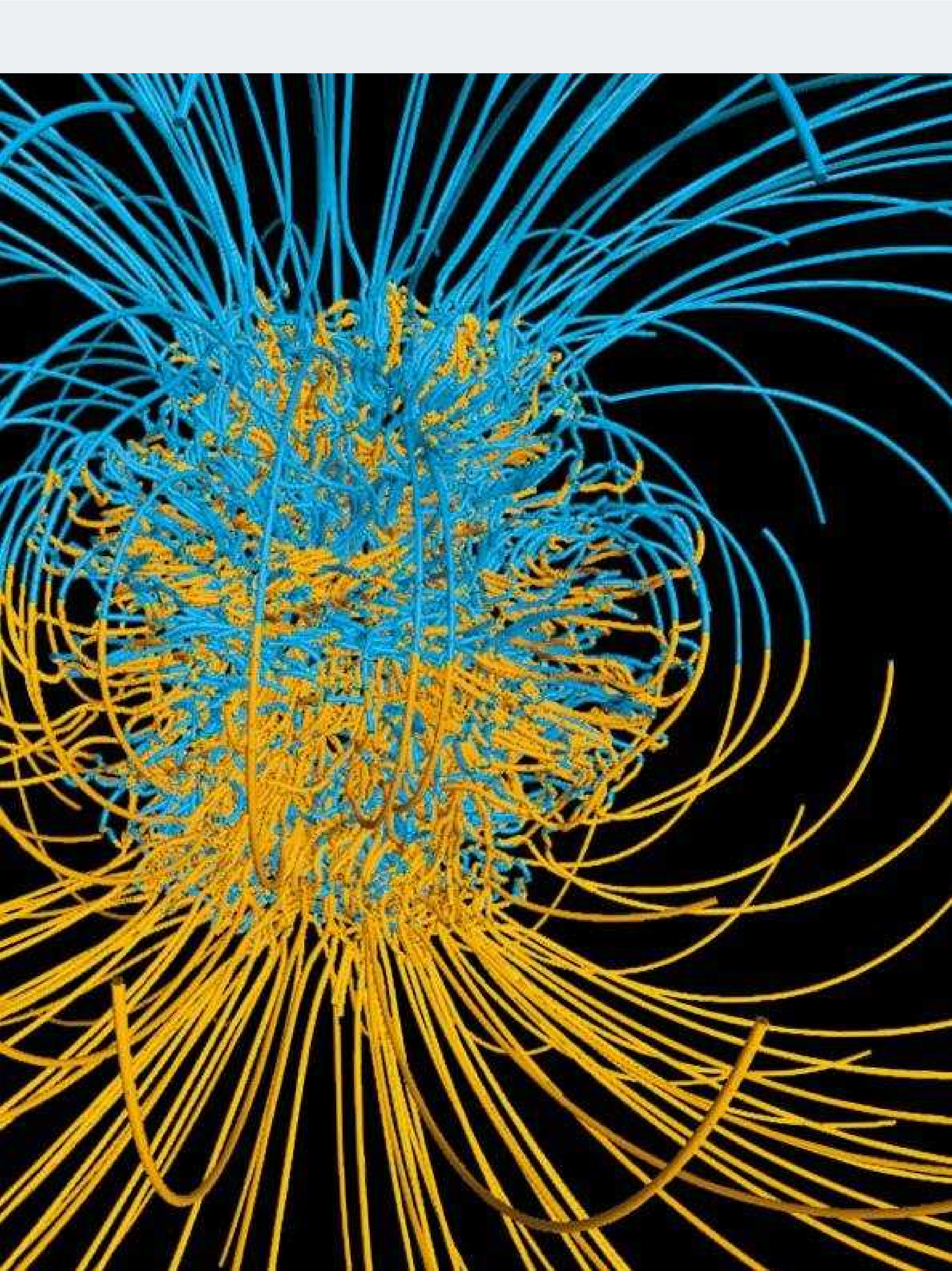
Seit Langem wissen die Geophysiker, dass sich die Quelle des wechselhaften Magnetfelds tief im Zentrum der Erde verbirgt. Unser Heimatplanet erzeugt – so wie die Sonne und einige andere ihrer Trabanten – sein eigenes Magnetfeld mit Hilfe eines inneren Dynamos. Dieser funktioniert im Prinzip wie ein elektrischer Generator: Das elektromagnetische Feld wird aus der kinetischen Energie sich bewegender Teile erzeugt. Im Generator dreht sich eine Drahtspule, während sich in einem Planeten oder Stern ein leitfähiges flüssiges oder gasförmiges Medium bewegt. Im Erdinnern hält eine riesige Masse aus geschmolzenem Eisen mit mehr als dem sechsfachen Volumen des Monds den Dynamo in Gang.

Bis vor Kurzem mussten sich die Wissenschaftler mit einfachen Theorien begnügen, um den Geodynamo und seine Eigenschaften zu beschreiben. In den letzten zehn Jahren jedoch fanden sie neue Zugänge zu diesem Phänomen. Während Satelliten detaillierte Aufzeichnungen des Magnetfelds an der Erdoberfläche lieferten, versuchten die Forscher, dieses Beobachtungsmaterial mit Modellen erdähnlicher Dynamos in Super- ▷



GARY A. GLATZMAIER

▶ **Die Computersimulation der geomagnetischen Feldlinien zeigt, dass das Magnetfeld außerhalb des Planeten wesentlich einfacher ist als innerhalb des Kerns (das verwickelte Knäuel in der Mitte). An der Erdoberfläche tritt der größte Teil des Felds nahe dem Südpol aus (lange gelbe Linien) und beim Nordpol wieder ein (lange blaue Linien).**



computern zu simulieren und mit aufwändigen Laborexperimenten nachzuvollziehen. Dank dieser Arbeiten lassen sich inzwischen die historischen Polaritätsumkehrungen recht gut erklären und Hinweise darauf ableiten, wann die nächste Umpolung beginnt.

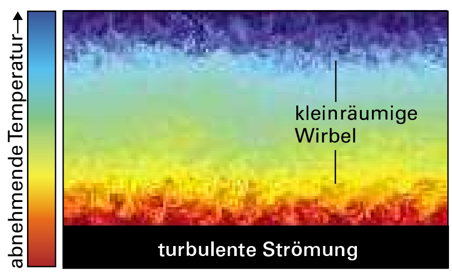
Doch bevor wir die Feldumkehr untersuchen, müssen wir uns mit dem Antrieb des Geodynamos befassen. Seit den 1940er Jahren wissen die Physiker, dass für die Erzeugung eines planetaren Magnetfelds drei Grundbedingungen erfüllt sein müssen. Neuere Forschungen bauen auf dieser Erkenntnis auf. Zunächst muss eine große Menge eines elektrisch leitfähigen Fluids vorhanden sein (also einer Flüssigkeit oder eines Gases). Diese Bedingung erfüllt der flüssige äußere Erdkern, der viel Eisen enthält und den festen inneren Kern aus nahezu reinem Eisen umschließt. Diesem äußeren Erdkern liegt eine 2900 Kilometer mächtige Schicht aus zähflüssigem Gestein auf, der Erdmantel, der wiederum von der sehr dünnen Erdkruste umgeben ist, aus der die Kontinente und der Meeresboden bestehen. Kruste und Mantel üben auf den Kern einen Druck von ungefähr dem Zweimillionenfachen des Luftdrucks an der Erdoberfläche aus. Ähnlich extreme Werte erreicht die Temperatur im Kern – rund 5000 Grad Celsius, das ist fast so heiß wie die Sonnenoberfläche.

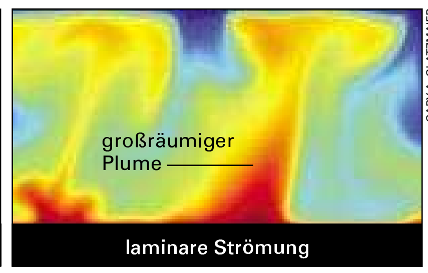
Konvektion wie in köchelnder Suppe

Diese extremen Zustandsbedingungen sorgen dafür, dass die zweite Anforderung für einen planetaren Dynamo erfüllt ist: eine Energiequelle, die das Fluid in Bewegung hält. Die den Geodynamo antreibende Energie ist teils thermischer, teils chemischer Art. Beide Anteile erzeugen in der Tiefe des Kerns einen Auftrieb. Wie in einem Topf Suppe, die auf dem Herd vor sich hin köchelt, ist es am Boden des Kerns heißer als an seiner Grenze zum Erdmantel. (Die hohe Kerntemperatur ist auf die Wärme zurückzuführen, die während der Entstehung der Erde in ihrem Innern zurückbehalten wurde.) Infolgedessen steigt das heißere, weniger dichte Eisen aus der Tiefe empor. An der Grenzschicht zum Mantel gibt es einen Teil der Wärme an diesen ab, sodass es abkühlt, dadurch dichter wird und wieder absinkt. Diesen Prozess des Wärmetransports durch aufsteigende und absinkende Materie nennen die Wissenschaftler thermische Konvektion.

In den 1960er Jahren vermutete Stanislav Braginsky (nun an der Universität von Kalifornien in Los Angeles), dass in dem Maße, in dem der äußere Kern Wärme nach außen transportiert, der feste innere Kern anwächst. Somit gäbe es zwei zusätzliche Faktoren, die für Auftrieb sorgen. Lagern sich beim Erstarren der Eisenschmelze Eisenkristalle an der Außenseite des inneren Kerns an, so wird Bindungsenergie frei, die zum thermischen Auftrieb beiträgt. Zudem werden weniger dichte Verbindungen wie Eisensulfid oder Eisenoxid aus den Kristallen des inneren Kerns ausgetrieben und steigen durch den äußeren Kern auf, was die Konvektion verstärkt.

Als dritte Bedingung für ein sich selbst erhaltendes Magnetfeld muss der Planet rotieren. Über die so genannte Corioliskraft beeinflusst die Drehung die im Erdkern aufsteigende und absinkende Schmelze auf die gleiche Weise, wie sie den Hoch- und Tiefdruckgebieten in der Atmosphäre ihren von den Wetterkarten her bekannten typischen Drehsinn vermittelt. Die Corioliskraft zwingt die aufsteigende Schmelze auf korkenzieherähnliche Schraubenbahnen, so als würden sie den Windungen einer Spiralfeder folgen.





Selbst mit den leistungsfähigsten Supercomputern lassen sich die turbulenten Konvektionsprozesse im flüssigen Erdkern nicht mit genügender Präzision simulieren. Kleinräumige Wirbel gelingen nur in der zweidimensionalen Simulation (links). Um jedoch einen Dynamoeffekt zu erzeugen, sind drei Dimensionen nötig; hierbei können die Forscher allerdings nur die großräumige laminare Konvektionsströmung untersuchen.

Diese drei Eigenschaften – eine eisenreiche Schmelze im Kern, genug Energie, um die Konvektion aufrechtzuerhalten, und die Corioliskraft, welche die Konvektionsströme verdrillt – sind die Hauptgründe, warum der Geodynamo seit Jahrmillionen unablässig funktioniert. Doch um zu klären, wie daraus das irdische Magnetfeld entsteht und warum es von Zeit zu Zeit seine Polarität wechselt, brauchen wir weitere Informationen.

Einen großen Schritt kamen die Wissenschaftler voran, als sie hochwertige Karten des Erdmagnetfelds verglichen, die im Abstand von zwanzig Jahren erstellt wurden. Der Nasa-Satellit Magsat hatte das geomagnetische Feld bereits 1980 vermessen; der dänische Forschungssatellit Ørsted und der vom Geoforschungszentrum Potsdam betriebene Minisatellit Champ taten das Gleiche ab 1999 beziehungsweise 2000. Unter der Annahme, dass die elektrischen Ströme im Erdmantel vernachlässigbar klein sind, projizierten die Forscher die Satellitendaten auf die Kern-Mantel-Grenze (siehe Grafik S. 59). Über die Verhältnisse im Erdkern, in dem die Fluktuationen

IN KÜRZE

- Die **Magnetisierung** bestimmter Gesteine belegt, dass die Polarität des Erdmagnetfelds ab und zu umkippt. Über die genaue Ursache rätseln die Forscher seit Langem.
- Mittlerweile können die Wissenschaftler zwar die Strömungen im flüssigen Erdkern und die **Polumkehr des Erdmagnetfelds** im Computer simulieren. Doch die Modelle sind wesentlich simpler als die tatsächlichen Verhältnisse im Erdinnern. Deshalb ist ungewiss, wie wirklichkeitsnah diese Simulationen sind.
- Weitere Erkenntnisse liefern **Laborexperimente und präzise Vermessungen des Erdmagnetfelds** mit Forschungssatelliten.

des Magnetfelds ihre Ursache haben, können die Wissenschaftler keine Aussagen treffen, denn starke elektrische Ströme verhindern jede direkte Messung des gewaltigen und sehr komplexen Magnetfelds in diesem Bereich. Trotz dieser Einschränkung haben die Forscher bemerkenswerte Erkenntnisse gewinnen können, unter anderem über den möglichen Beginn einer neuen Polumkehr.

Das Dipolfeld kippt – geologisch gesehen – sehr rasch

Ein wichtiger Befund war, dass der größte Teil des Erdmagnetfelds nur vier ausgedehnten Regionen auf der Kern-Mantel-Grenze entspringt. Wenngleich der Geodynamo ein sehr starkes Magnetfeld erzeugt, verlässt nur etwa ein Prozent der Feldenergie den Kern. An der Erdoberfläche weist das Feld eine Dipolstruktur auf, deren Achse zumeist in etwa mit der Rotationsachse der Erde zusammenfällt. Wie bei einem einfachen Stabmagneten tritt der größte Teil des magnetischen Flusses durch die Südhemisphäre aus dem Kern aus und durch die Nordhalbkugel wieder in ihn ein. (Die Kompassnadel zeigt zum geografischen Nordpol, weil der südliche Pol des magnetischen Dipols in dessen Nähe liegt.) Aber die Satellitenmessungen haben gezeigt, dass der magnetische Fluss nicht gleichmäßig über den Globus verteilt ist. Vielmehr konzentriert er sich auf Regionen in Nordamerika, Sibirien und die Küste der Antarktis.

Ulrich R. Christensen vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau vermutet, dass die großen Flecken über die Jahrtausende entstehen und wieder verschwinden und dass diese Dynamik auf den beständigen Wandel im Konvektionsmuster innerhalb des Kerns zurückzuführen ist. Könnte ein ähnliches Phänomen der Grund für die Dipolumkehrungen sein? Geologische Hinweise zeigen, dass die vergangenen Umpolungen innerhalb sehr kurzer Zeitspannen von etwa 4000 bis 10000 Jahren abliefen. Würde der Geodynamo mit einem Schlag ausfallen, so bräuchte das Dipolfeld rund 100000 Jahre, um von selbst zu verschwinden. Eine schnellere Änderung weist darauf hin, dass eine Störung die ursprüngliche Polarität aufhebt und gleichzeitig eine neue aufbaut.

Um eine einzelne Polumkehr zu erklären, kämen als Ursache einer solchen Störung chaotische Veränderungen im Muster des magnetischen Flusses in Frage, die gelegentlich das globale Dipolfeld zum Kippen bringen. Doch die stetige Zunahme der Umpolungen über die letzten 120 Millionen Jahre hinweg weist eher auf einen äußeren Auslöser hin (siehe Grafik auf S. 61). Ein Kandidat dafür sind Temperaturänderungen am Grund des Mantels, durch die sich die Konvektionsmuster des Kerns ändern könnten.

Anzeichen eines möglicherweise bevorstehenden Dipolwechsels fand eine andere Gruppe von Wissenschaftlern in den Karten von Magsat und Ørsted. Gauthier Hulot und seine Koautoren vom Geophysikalischen Institut in Paris bemerkten, dass sich das Erdmagnetfeld an denjenigen Stellen der Kern-Mantel-Grenze fortwährend verändert, an denen der Magnetfluss entgegengesetzt zu der auf dieser Hemisphäre üblichen Flussrichtung verläuft. Die größte jener Regionen mit umgekehrtem Fluss erstreckt sich unterhalb der Südspitze Afrikas westwärts bis zur Südspitze Südamerikas. In dieser Zone ist der Fluss nach innen, also kernwärts, gerichtet, während ansonsten der Fluss in der südlichen Hemisphäre nach außen gerichtet ist.

Zu den wichtigsten Erkenntnissen, die sich aus dem Vergleich der Ørsted- mit den Magsat-Daten von 1980 gewinnen ließen, gehört, dass sich auch an anderen Stellen der Kern-Mantel-Grenze ein Flussrichtungswechsel abzeichnet – beispielsweise unter der Ostküste Nordamerikas und der Arktis. Zudem haben sich die bisherigen Bereiche mit umgekehrtem Fluss vergrößert und polwärts bewegt. Genau mit diesen Phänomenen lässt sich die historisch beobachtete Abnahme des Dipolfelds erklären, wie David Gubbins von der Universität Leeds (England) bereits Ende der 1980er Jahre erkannte hatte.

Feldlinien wie ein Haufen Spagetti

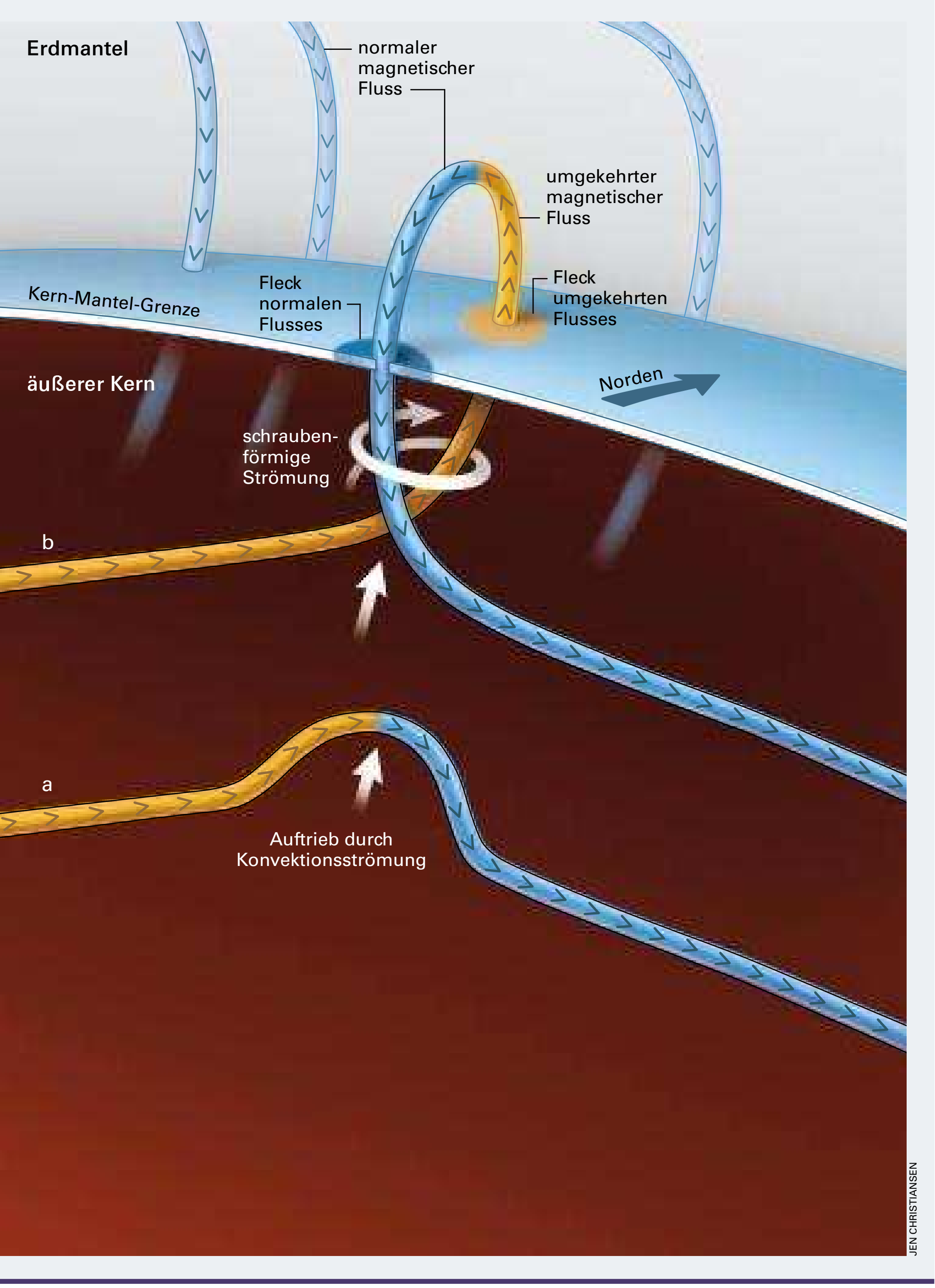
Der Flussrichtungswechsel und die Poldrift der betreffenden Gebiete lassen sich am besten mit dem Modell der magnetischen Feldlinien verstehen (auch wenn das Feld in Wirklichkeit nicht aus diskreten Linien besteht, sondern den Raum zur Gänze erfüllt). Wir können uns diese Kraftlinien als im flüssigen Eisenkern eingefroren denken: Sie werden mit der strömenden Materie mitgeführt, so wie ein Farbtropfen in einem Glas Wasser, das umgerührt wird. Konvektionszellen und Wirbel im Erdkern verdrillen infolge der Corioliskraft die magnetischen Feldlinien in Bündel, die an einen Haufen Spagetti erinnern. Jede ▷

INNENSCHNITT: JEN CHRISTIANSEN; ANSICHT DER KONTINENTE: GARY A. GLATZMAIER

Im flüssigen, metallreichen äußeren Kern der Erde induzieren turbulente Konvektionsströmungen das irdische Magnetfeld.

Flussumkehr im Magnetfeld

Verdrillte Magnetfeldlinien bilden Schleifen, die manchmal durch die Oberfläche des Erdkerns treten. Dadurch entstehen an der Kern-Mantel-Grenze Regionen, in denen der Fluss im Vergleich zum Rest der Hemisphäre umgekehrt ist. Diese Anomalien mit umgekehrtem Fluss können das Gesamtfeld schwächen und sogar ein Indiz für einen beginnenden Polwechsel sein. Solche Anomalien entstehen, wenn aufsteigende Materie im schmelzflüssigen äußeren Kern die dort normalerweise horizontalen Magnetfeldlinien mit sich zieht. Ist diese konvektive Strömung lokal verstärkt, beult sich die Linie aus (a). Infolge der Erdrotation wird die Ausbeulung schraubenförmig zu einer Schlinge verdreht (b). Ist der Auftrieb so stark, dass er die Schleife aus dem Kern hebt, entstehen an der Kern-Mantel-Grenze zwei Flussregionen unterschiedlicher Polarität.



▷ Verwirbelung packt mehr solcher Linien in den Kern und erhöht so die Energie des Magnetfelds. (Würde dieser Prozess ungehindert weitergehen, wüchse die Feldstärke ins Unendliche an. Aber da der elektrische Widerstand die Feldlinien auseinander zu treiben und die Knäuel aufzulösen sucht, verhindert er unendliches Wachstum, schaltet den Dynamo aber auch nicht ab.)

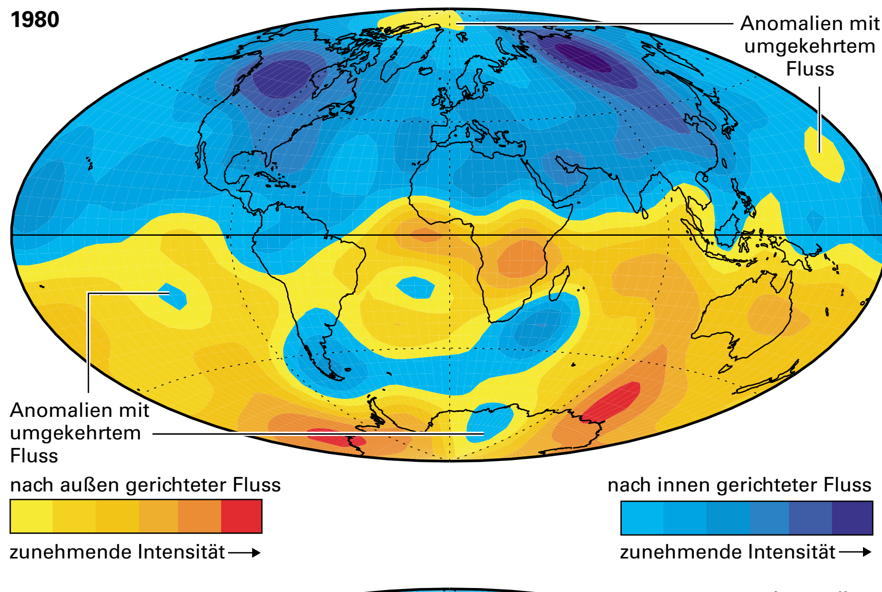
An der Kern-Mantel-Grenze können sich Regionen mit extrem starkem Magnetfeld bilden – sowohl mit normaler wie auch mit umgekehrter Flussrichtung. Sie entstehen, wenn Konvektionszellen und Wirbel mit ostwestlich gerichteten torusförmigen Magnetfeldern im Kern interagieren. Die turbulenten Strömungen verbiegen die toroidalen Feldlinien zu Schlaufen, die poloidal genannt werden und von Nord nach Süd ausgerichtet sind. Manchmal erzeugt auch die aufsteigende Flüssigkeit eine solche Verschlingung. Ist der Auftrieb groß genug, wird die poloidale Schlaufe aus dem Kern herausgetrieben (siehe Kasten links). Dadurch entstehen an den Durchstoßpunkten in der Kern-Mantel-Grenze zwei Flussregionen unterschiedlicher Polarität. In einer zeigt der Fluss in normale Richtung – ist also genauso orientiert wie der größte Teil des Flusses in dieser Hemisphäre. In der anderen Region ist der Fluss entgegengesetzt ausgerichtet, hier herrscht also Flussumkehr.

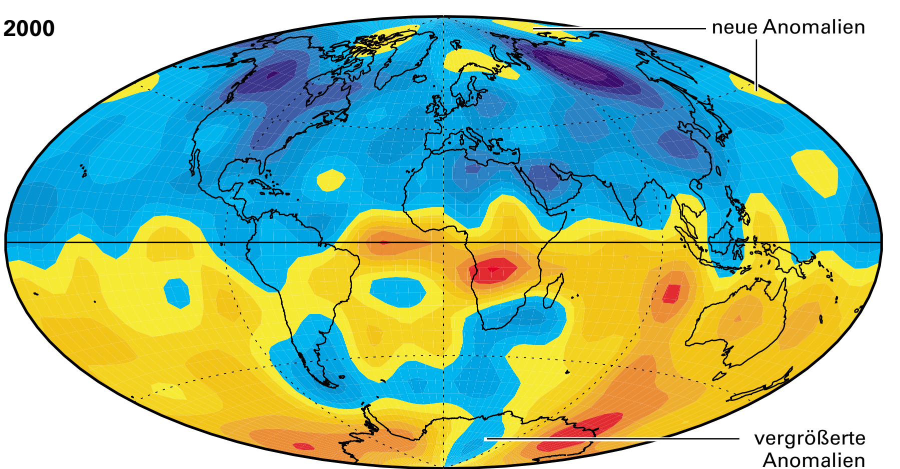
Der Geodynamo im Computer

Liegt nun die Region mit umgekehrtem Fluss näher am geografischen Pol als die normale, wird das Dipolfeld geschwächt, da es gegenüber Änderungen in Polnähe besonders empfindsam reagiert. Genau dies geschieht gegenwärtig unterhalb der Südspitze von Afrika. Um aber das Erdmagnetfeld in seiner Gesamtheit umzupolen, müsste diese Anomalie wachsen, bis sie das Südpolargebiet vollständig umfasst. Gleichzeitig müsste der gleiche Prozess nahe dem geografischen Nordpol stattfinden.

Aber wie entwickeln sich Regionen mit umgekehrtem Fluss und weisen sie wirklich auf eine kommende globale Umpolung hin? Um dies zu untersuchen, simulieren Forscher den Geodynamo mit Supercomputern und im Labor. Im Jahr 1995 begannen drei Forschergruppen an verschiedenen Universitäten mit der numerischen Simulation von Magnetfeldern, die dem an der Erdober-

Karten des Erdmagnetfelds, wie sie aus Satellitendaten erstellt wurden, lassen sich rechnerisch auf die Kern-Mantel-Grenze extrapolieren. Der größte Teil des magnetischen Flusses verlässt den Kern durch die südliche Hemisphäre und tritt durch die Nordhalbkugel wieder ein. Doch an manchen Stellen ist es umgekehrt. Diese Anomalien mit umgekehrtem Fluss haben sich zwischen 1980 und 2000 weiter ausgedehnt. Wenn sie beide Pole einschließen, könnte dies eine Polaritätsumkehr bewirken.





PETER OLSON, NACH: GAUTHIER HULOT ET AL., NATURE, 11.04.2002, BD. 416, S. 620-623

fläche sehr ähnlich sind: das Team von Akira Kageyama in Tokio (Japan), eine Gruppe um Christopher A. Jones in Exeter (England) sowie Paul H. Roberts und einer von uns (Glatzmaier) an der Universität von Kalifornien in Los Angeles. Die seitdem durchgeführten Simulationen umfassen mehrere hunderttausend Jahre der Erdgeschichte. Sie zeigen, dass durch Konvektionsprozesse tatsächlich Regionen mit umgekehrtem Fluss an der Kern-Mantel-Grenze entstehen können – und zwar genau von der Art, wie sie in den Satellitenkarten zu sehen sind. Oft erscheinen sie vor einer spontanen Dipolumkehr, die manche Modelle ebenfalls simulieren können.

Der Polwechsel im Computer gibt den Wissenschaftlern einen ersten groben Eindruck davon, wie solche Prozesse ablaufen (siehe Kasten auf S. 60). Bei einer 3-D-Simulation über 30 0000 Jahre – sie benötigte länger als ein Jahr mit einer Rechenzeit von zwölf Stunden pro Tag – begann die Polumkehr mit einer Abnahme der Dipolfeldstärke. Anschließend entstanden viele Regionen mit umgekehrtem Fluss, wie wir sie heute an der Kern-Mantel-Grenze beobachten. Aber anstatt das Feld komplett auszulöschen, erzeugten die Regionen während des Übergangs ein schwaches Feld mit einer komplizierten Mischung von Polaritäten.

Auf der Oberfläche der modellierten Erde machte sich die Polumkehr erst dann bemerkbar, als die Regionen mit umgekehrtem Fluss über die ursprüngliche Polarität der Kern-Mantel-Grenze dominierten. Alles in allem dauerte es etwa 9000 Jahre, bis im gesamten Kern die alte Polarität verschwunden war und durch eine neue ersetzt wurde.

Der Erfolg der Dynamo-Computermodelle hat auch andere Forschungsgruppen angespornt. Inzwischen versuchen mehr als ein Dutzend Teams weltweit, mit Hilfe solcher Simulationen die Magnetfelder diverser Himmelskörper zu verstehen. Aber wie gut stimmen die Geodynamo-Modelle mit dem tatsächlichen Mechanismus im Erdinnern überein? Um ehrlich zu sein: Das weiß eigentlich niemand so genau.

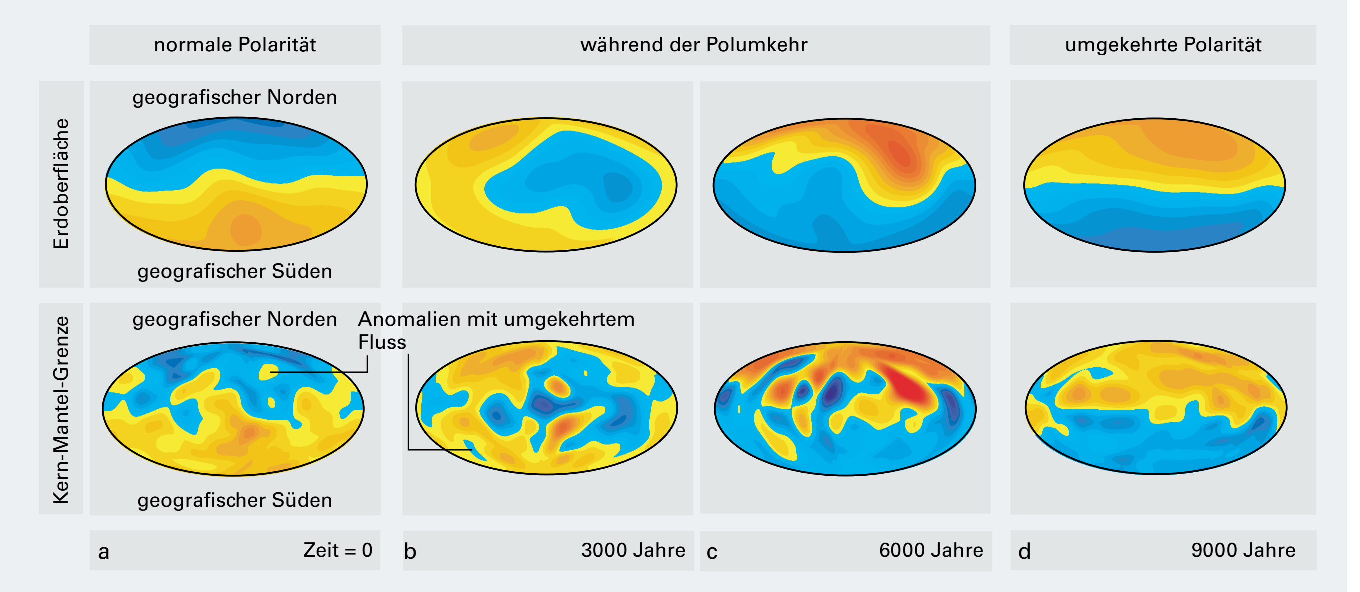
Simulationen nicht wirklichkeitsnah

Bisher vermochte keines der Computermodelle das gesamte Spektrum der Turbulenzen im Innern eines Planeten zu simulieren. Selbst die modernen Hochleistungsparallelrechner sind noch nicht schnell genug, um ohne vereinfachende Annahmen magnetische Turbulenz in drei Dimensionen zu bewältigen. Die kleinsten Konvektionszellen und Wirbel, die das Magnetfeld im Erdkern verdrillen, sind vermutlich nur wenige Meter groß. Das ist weitaus kleiner als die Auflösung, die ein heutiger Supercomputer mit den gegenwärtigen globalen Geodynamo-Modellen erreichen kann. Das bedeutet, dass alle bisherigen 3-D-Simulationen des Geodynamos nur den einfachen Fall einer großräumigen laminaren Konvektionsströmung – ähnlich dem behäbigen Aufsteigen des farbigen Öltropfens in einer Lavalampe – behandeln konnten.

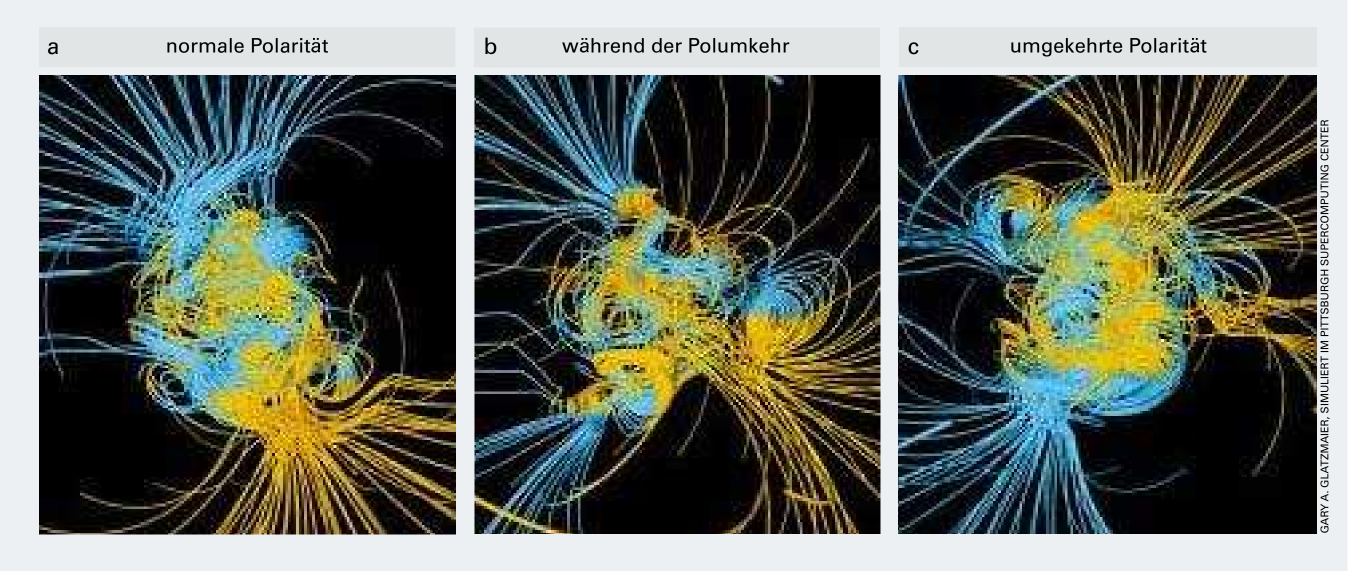
In den laminaren Strömungsmodellen können sich die Forscher zwar an Turbulenzeffekte herantasten, müssen dazu aber für bestimmte Eigenschaften des flüssigen Kerns – wie zum Beispiel die Zähigkeit – unrealistisch hohe Werte ansetzen, um kleine Wirbel zu unterdrücken. Wirklichkeitsnahe Turbulenzen liefern die Computersimulationen nur, wenn sich die Wissenschaftler auf zweidimensionale Modelle beschränken. Doch eine zweidimensionale Materieströmung vermag wiederum keinen Dynamo in Gang zu halten. Immerhin verdeutlichen diese Modelle, dass die laminaren Strömungen, die man in den heutigen Geodynamo-Simulationen ▷

Simulierte Polaritätsumkehr

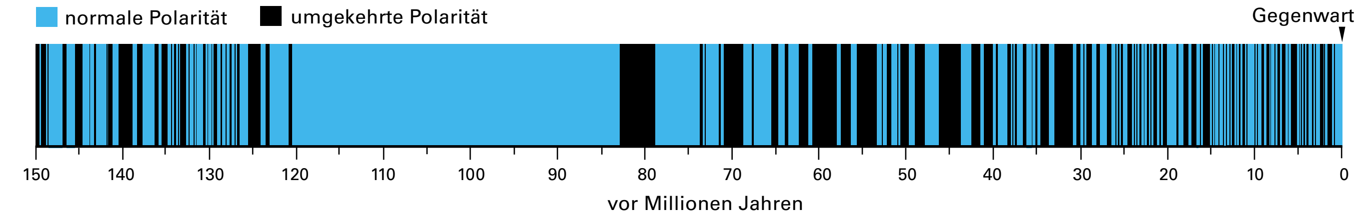
Dreidimensionale Computersimulationen des Geodynamos können inzwischen spontane Polaritätswechsel des irdischen Dipolfelds nachvollziehen. Damit versuchen die Forscher, die Ursachen der aus paläomagnetischen Messungen bekannten Umpolungen herauszufinden (siehe Zeitleiste auf der rechten Seite). Eine simulierte Polumkehr – anhand eines Modells, das einer der Autoren (Glatzmaier) mitentwickelt hat – lief über einen Zeitraum von 9000 Jahren ab. Die Ergebnisse lassen sich in Karten des magnetischen Flusses in vertikaler Richtung darstellen, sowohl für die Erdoberfläche (erste Reihe im oberen Teilbild) als auch für die Kern-Mantel-Grenze (zweite Reihe), wo das Feld komplexer ist. Eine andere Darstellungsweise des Polaritätswechsels nutzt das Feldlinienbild, in dem die magnetischen Feldlinien als dünne Fäden erscheinen (unteres Teilbild).



Die simulierten Magnetfeldkarten beginnen bei normaler Polarität (a), das heißt, der Fluss tritt an der Südhalbkugel aus dem Kern aus (gelb) und an der Nordhalbkugel wieder ein (blau). Die Umpolung beginnt, wenn sich mehrere Anomalien mit umgekehrtem Fluss bilden, wie wir es zurzeit an der Kern-Mantel-Grenze beobachten. Nach ungefähr 3000 Jahren haben diese Anomalien das dipolförmige Hauptfeld derart geschwächt, dass es durch ein schwächeres, komplexeres Übergangsfeld ersetzt wird (b). Die Umpolung ist nach 6000 Jahren in vollem Gang; die Regionen umgekehrten Flusses dominieren nun über die Regionen der ursprünglichen Polarität (c). Betrachtet man nur die Erdoberfläche, scheint die Umpolung jetzt schon vollzogen. Es dauert jedoch noch weitere 3000 Jahre, bis sich die Polumkehr auch im gesamten Kern durchgesetzt hat (d).



Im Feldlinienbild lässt sich die Struktur des geomagnetischen Felds tief im Erdkern (Knäuel im Zentrum) und der Austritt der Feldlinien (lange gebogene Linien) darstellen. 500 Jahre vor (a) und 500 Jahre nach (c) Mitte des Polumkehrprozesses ist noch eine Dipolstruktur zu erkennen. Während des Polaritätswechsels (b) hat das irdische Magnetfeld eine verworrene Struktur.



JEN CHRISTIANSEN, NACH: D.V. KENT & W. LOWRIE, TIMESCALES OF THE PALEOMAGNETIC FIELD, HRSG: J.E.T. CHANNELL ET AL., AGU 2004

▲ Polaritätswechsel fanden während der letzten 150 Millionen Jahre hunderte Male statt und wahrscheinlich auch schon lange davor. Forscher fanden diese Umpolungen, als sie magnetische Minerale untersuchten. Kleine Magnetitkristalle richten sich beim Erstarren des Gesteins nach der jeweiligen Polarität des Erdmagnetfelds aus.

▷ sieht, viel zu sanft und einfach sind, um ein Abbild der im Erdkern erwarteten Turbulenzen sein zu können.

Wahrscheinlich liegt die größte Abweichung in den Wegen, denen auf- und absteigende Materieelemente folgen. In einfachen Simulationen laminarer Konvektion erstrecken sich pilzartige Säulen aufsteigenden Materials – so genannte Plumes – von der Untergrenze des flüssigen Kerns bis zur Kern-Mantel-Grenze. In den turbulenten 2-D-Modellen hingegen bestimmen viele kleine Plumes und Wirbel die Konvektion; sie gehen von der oberen und unteren Grenze des Kerns aus und treten dann in der dazwischenliegenden Hauptkonvektionszone miteinander in Wechselwirkung.

Solche Unterschiede im Strömungsmuster könnten die Struktur des Erdmagnetfelds und seine Dynamik erheblich beeinflussen. Aus diesem Grund arbeiten die Forscher emsig an der nächsten Generation von 3-D-Modellen. In vielleicht zehn Jahren werden die Rechner so schnell sein, dass sie einen stark turbulenten Geodynamo modellieren können. Bis dahin erhoffen wir uns viele Erkenntnisse durch Laborexperimente, die zurzeit durchgeführt werden.

Selbst erregtes Magnetfeld im Labor

Ein Vergleich von Computermodellen (die nicht turbulent sind) mit Laborexperimenten (in denen keine Konvektion auftritt) kann helfen, den Geodynamo zu verstehen. Schon in den 1960er Jahren wurde gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, einen solchen Dynamo im Labor herzustellen. Doch der Weg zum Erfolg war lang. Ein Problem war der immense Größenunterschied zwischen dem echten Planetenkern und einem Laborgerät, der es erschwert, die Materialeigenschaften und die Strömungsfelder im Experiment der wirklichen Situation anzunähern.

Die Physiker nutzen eine dimensionslose Kennzahl, die so genannte magnetische Reynoldszahl, um die Strömungs- und Materialeigenschaften zu charakterisieren. Damit sich ein flüssiger Dynamo selbst erhält, muss die magnetische Reynoldszahl größer als zehn sein. Für den Kern der Erde ist hingegen ein Wert von etwa 1000 anzusetzen. Eine solch große magnetische Reynoldszahl in einem kleinen Versuchsvolumen zu erzeugen, ist extrem schwierig; die Flüssigkeit muss sich dazu unglaublich schnell bewegen.

Nach langjährigen Vorarbeiten gelang es im Jahr 2000 einer lettischen und einer deutschen Forschergruppe, ein selbst erregtes Magnetfeld in einem Labordynamo zu erzeugen. Die Teams um Agris Gailitis am Institut für Physik in Riga und um Robert Stieglitz und Ulrich Müller am Forschungszenrum Karlsruhe sowie Fritz Busse von der Universität Bayreuth nutzten dazu flüssiges Natrium als strömendes Medium. Dieses Metall eignet sich wegen seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit und seines niedrigen Schmelzpunkts besonders gut für solche Experimente. Beide Gruppen pumpten die Flüssigkeit mit hoher Geschwindigkeit durch ein System von ein bis zwei Meter langen schraubenförmigen Röhren und erreichten so die kritische magnetische Reynoldszahl von zehn (siehe »Der Geodynamo im Labor«, Spektrum der Wissenschaft 2/2002, S. 56).

Solche Experimente geben uns im Zusammenspiel mit theoretischen Modellen Auskunft darüber, inwieweit unsere Vorstellungen von planetaren Dynamos richtig sind. Mehrere Gruppen in verschiedenen Ländern bereiten nun die nächste Generation von Labordynamos vor. Die Geometrie der neuen Apparaturen ist mit kugelförmigen Kammern – die größte mit einem Durchmesser von fast drei Metern – der Realität besser angepasst.

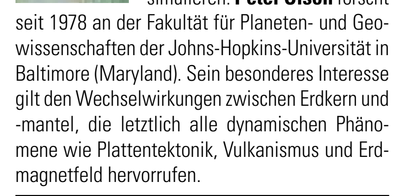
Die Forscher beschreiten zurzeit also drei Wege, um ihr Wissen über den Geodynamo zu erweitern: Laborexperimente, 3-D-Computersimulationen und genaue Vermessungen des Erdmagnetfelds mittels Satelliten. Mit dem Minisatelliten Champ ist es möglich, die Änderungen des geomagnetischen Felds an der Kern-Mantel-Grenze in Echtzeit zu verfolgen. Damit können wir das weitere Wachstum der Regionen umgekehrten Flusses und ihre Wanderung unmittelbar beobachten. Die Synthese aller drei Forschungsansätze wird uns in zehn oder zwanzig Jahren ein vollständigeres Bild des außergewöhnlichen Geodynamo-Phänomens liefern. Dann werden wir sehen, ob wir mit unseren Vorstellungen vom irdischen Dipolfeld und seinen Umpolungen auf der richtigen Spur sind. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





Gary A. Glatzmaier (oben) ist Professor für Geowissenschaften an der Universität von Kalifornien in Santa Cruz. Mitte der 1990er Jahre gelang es ihm am Los-Alamos-Nationallaboratorium (gemeinsam mit Paul H. Roberts von der Universität von Kalifornien in Los Angeles) erstmals, im Rechner die Umpolung eines erdähnlichen Dipolfelds zu simulieren. **Peter Olson** forscht seit 1978 an der Fakultät für Planeten- und Geowissenschaften der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland). Sein besonderes Interesse gilt den Wechselwirkungen zwischen Erdkern und -mantel, die letztlich alle dynamischen Phänomene wie Plattentektonik, Vulkanismus und Erdmagnetfeld hervorrufen.



Recent geodynamo simulations and observations of the geomagnetic field. Von M. Kono und P. H. Roberts in: Reviews of Geophysics, Bd. 40, Heft 4, S. 1013, 2002

Geodynamo simulations: How realistic are they? Von G.A. Glatzmaier in: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Bd. 30, S. 237, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Wie Erinnerungen haften bleiben

Manche Erlebnisse sind unvergesslich, während andere schnell aus dem Gedächtnis entschwinden. Diesem Effekt liegen ähnliche Mechanismen zu Grunde wie der Herausbildung funktioneller Neuronennetze im Gehirn von Ungeborenen.

Von R. Douglas Fields

Leonard, die Hauptfigur des Kinothrillers »Memento«, hat eine anterograde Amnesie. Sein Gedächtnis reicht nur bis zu dem Tag, an dem ein Einbrecher seine Frau ermordete und ihn selbst schwer am Kopf verletzte. Seither gilt: Wen er trifft und was geschieht, kann er sich immer nur kurz merken; danach ist die Erinnerung wie ausgelöscht. Sein Gehirn hat schlicht die Fähigkeit verloren, Erlebnisse in dauerhafte Gedächtnisinhalte umzuwandeln. Wie besessen sucht Leonard den Mörder seiner Frau, um ihren Tod zu rächen. Gefangen in der ewigen Gegenwart, bleibt ihm dabei nichts anderes übrig, als sich die Ergebnisse seiner Nachforschungen auf seinen Körper zu tätowieren.

Die Vorlage zu dieser unheimlichen Geschichte lieferte der reale Fall eines Patienten, der in der medizinischen Literatur unter dem Kürzel H. M. bekannt wurde. Dieser zog sich im Jahr 1935 bei einem Fahrradunfall im Alter von neun Jahren eine Schädel-Hirn-Verletzung zu, die eine schwere Epilepsie zur Folge hatte. Da das Leiden damals medikamentös nicht zu beherrschen war, entschlossen sich die Ärzte zu dem verzweifelten Schritt, den Hippocampus und angrenzende Hirnregionen, von denen die Anfälle ausgingen, chirurgisch zu entfernen. Nach der Operation traten die Krämpfe tatsächlich seltener auf, allerdings hatten die Chirurgen unwissentlich auch die seinerzeit noch unbekannte Verbindung zwischen Kurz- und Langzeitgedächtnis gekappt. Das verursachte die in »Memento« so eindringlich dargestellte Amnesie.

Schleusen im Informationsfluss

Als Speicher für Erinnerungen an Menschen, Orte oder Ereignisse dient das deklarative oder explizite Gedächtnis. Die dafür bestimmten Informationen müssen allerdings den Hippocampus passieren, bevor sie in der Hirnrinde aufgezeichnet werden. Deshalb hatte H. M. die bereits abgespeicherten Erinnerungen an länger zurückliegende Ereignisse bewahrt, während ihm alles neu Erlebte rasch wieder entfiel. Zum Beispiel glaubte er bei den monatlichen Arztbesuchen stets, er käme zum ersten Mal zur Untersuchung.

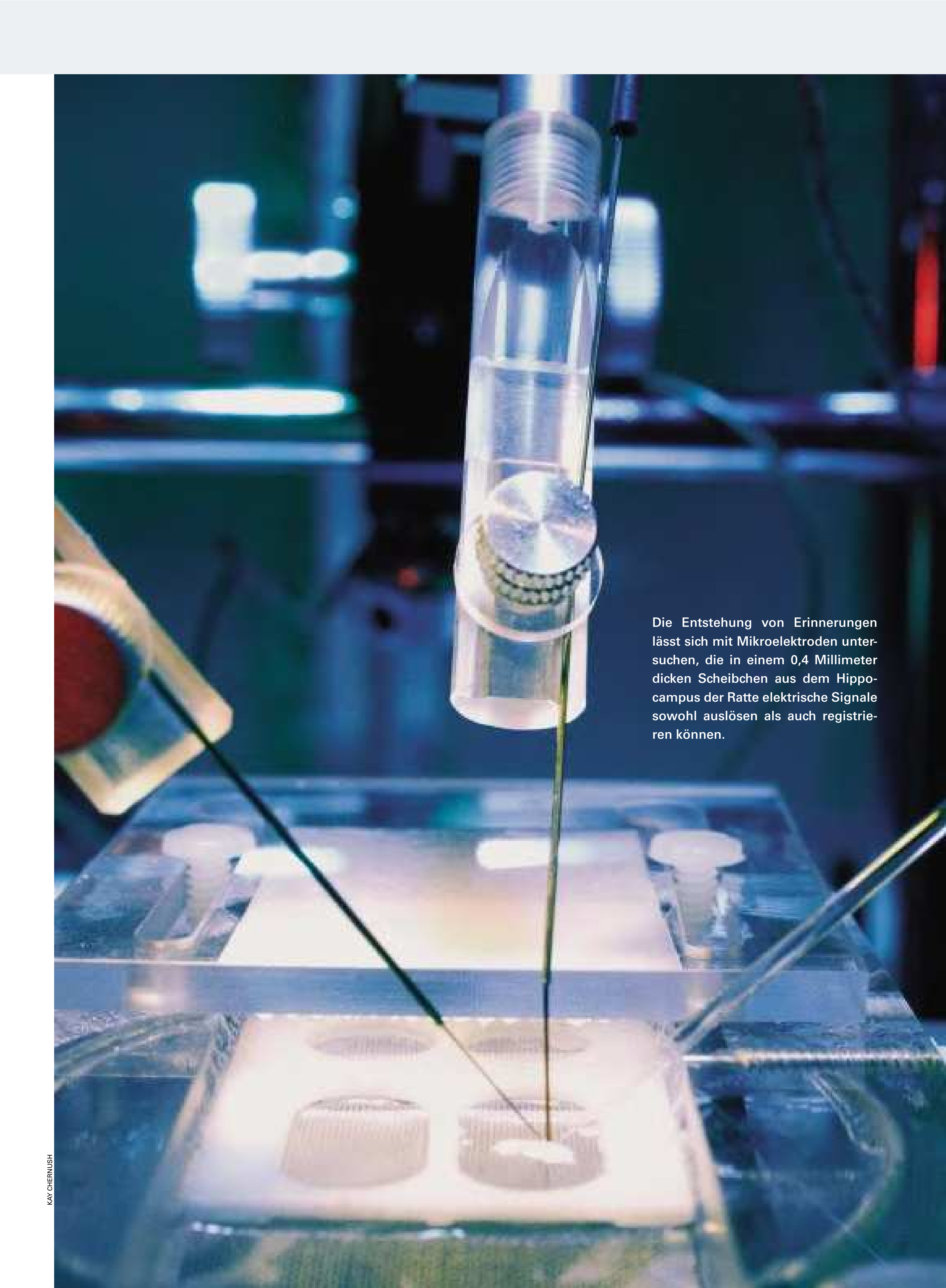
Die Umwandlung aktueller Erlebnisse in dauerhafte Gedächtnisinhalte fasziniert die Neurobiologen schon seit Langem. Der Name einer Person, der man zum ersten Mal begegnet, landet zunächst nur im Kurzzeitgedächtnis und kann innerhalb von Minuten wieder vergessen sein. Andere Informationen, die von Anfang an wichtig erscheinen, dringen dagegen ins Langzeitgedächtnis vor und bleiben im Idealfall ein Leben lang abrufbar.

Wie funktioniert der Mechanismus, mit dem das Gehirn manche Momente festhält und andere dem Vergessen anheim gibt? Dieses Rätsel konnten Neurowissenschaftler in den letzten Jahren teilweise lösen. Doch zuvor mussten sie ein zellbiologisches Paradox aufklären.

Die neurophysiologische Basis von Lang- wie Kurzzeitgedächtnis sind die Synapsen. An ihnen nimmt das Axon eines Neurons – der lange, dünne Ausläufer, mit dem es Signale sendet – mit einem der zahlreichen Dendriten eines anderen Neurons – den kurzen, buschigen Fortsätzen, die Signale empfangen – Kontakt auf. Bei der Speicherung einer Information im Kurzzeitgedächtnis werden Synapsen vorübergehend für die ankommenden Botschaften sensibilisiert oder »potenziert«, wie die Neurologen sagen. Die Signalübertragung erfolgt dann leichter und schneller. Im Langzeitgedächtnis nimmt diese »Bahnung« schließlich permanenten Charakter an. ▷

IN KÜRZE

- Nervenzellen müssen entscheiden, welche Erinnerungen sie in Form **dauerhafter Verbindungen zu anderen Neuronen** bewahren und welche nicht. Auch das heranreifende Gehirn verstärkt nur bestimmte Kontakte zwischen Nervenzellen und macht daraus feste Verschaltungen, während es andere auflöst.
- Beide Prozesse erfordern, dass **elektrochemische Vorgänge** an den entlegenen Fortsätzen eines Neurons im Zellkern bestimmte Gene aktivieren, deren Proteinprodukte dann zu den Randbezirken zurückwandern.
- Diese **Aktivierung** findet nur statt, wenn die Nervenzelle wiederholt stark genug angeregt wurde, um zu feuern.
- In diesem Fall öffnen sich spannungsgesteuerte Kanäle, die Kalzium einströmen lassen. Dies löst eine **zeitgesteuerte Signalkaskade** aus, die zur Aktivierung der Gene führt.



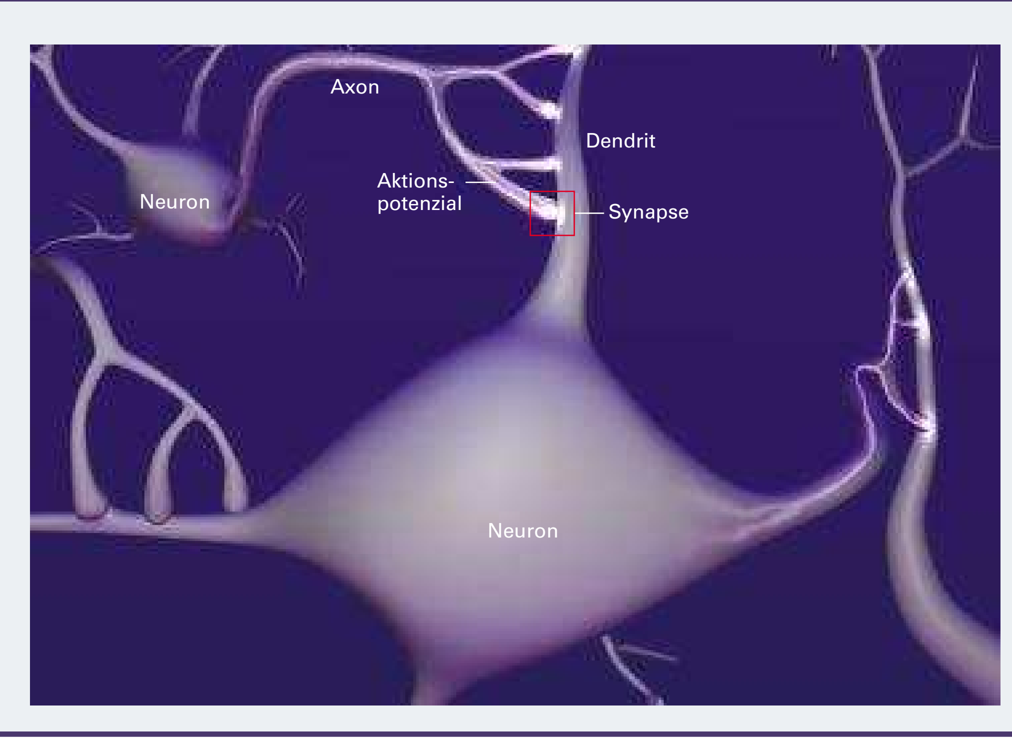
Die Entstehung von Erinnerungen lässt sich mit Mikroelektroden untersuchen, die in einem 0,4 Millimeter dicken Scheibchen aus dem Hippocampus der Ratte elektrische Signale sowohl auslösen als auch registrieren können.

KAY CHERNUSH

Die Vorgänge an den Nervenzellkontakten

Wir merken uns etwas, wenn mehrere miteinander verschaltete Nervenzellen die Empfindlichkeit ihrer Kontaktstellen erhöhen, sodass Signale zwischen ihnen leichter übertragen werden. Im Fall des Kurzzeitgedächtnisses hält dieser Effekt, den die Neurologen Potenzierung nennen, nur für Minuten bis wenige Stunden an. Damit dauerhafte Gedächtnisinhalte entstehen, müssen die Kontaktstellen – fachsprachlich: Synapsen – permanent potenziert bleiben.

Eine solche dauerhafte Verstärkung findet nur statt, wenn ein Signal besonders stark oder mehrfach übertragen wird. Bei dieser Übertragung gelangt ein elektrochemischer Impuls vom Axon (»Transmitterkabel«) des sendenden Neurons über die Synapse zu einem Dendriten (»Sensorkabel«) der Empfängerzelle (rechts).



Seit den 1960er Jahren ist bekannt, dass dazu Gene der Neuronen exprimiert, das heißt die darin verschlüsselten Proteine hergestellt werden müssen.

Gedächtnisforscher rätseln seit Langem, wie die Genexpression tief im Zellkern gezielt die Aktivität einzelner weit entfernter Synapsen beeinflussen kann und woher die wahllos im Zytoplasma synthetisierten Proteine »wissen«, welche der vielen tausend Kontaktstellen sie verstärken sollen und für wie lange.

Analoge Fragen stellen sich bei der Entwicklung des fetalen Gehirns. Die dort wachsenden Nervenzellen kontaktieren sich nämlich erst einmal blindlings und müssen nachträglich entscheiden, welche ihrer Myriaden von Synapsen erhalten bleiben und welche wieder aufgelöst werden sollen. Als wir diese Phänomene untersuchten, entdeckten wir die faszinierende Antwort auf eines der größten Rätsel der Gedächtnisforschung.

Schnellstraßen für Signale

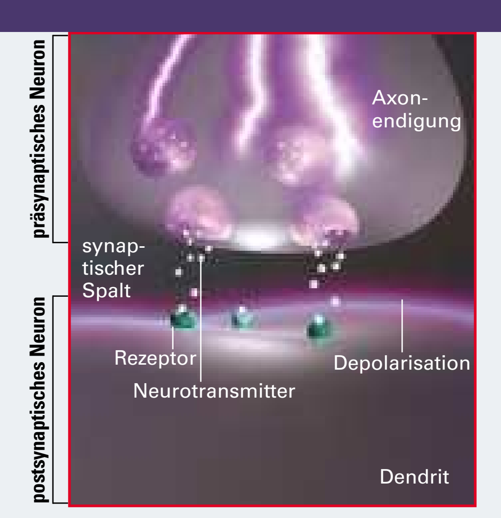
Dass die Aktivierung bestimmter Gene eine zentrale Rolle bei der Verfestigung von Gedächtnisinhalten spielt, ist schon seit den 1960er Jahren bekannt. Wie sich in Tierexperimenten zeigte, müssen für das Erlernen einfacher Aufgaben im Gehirn innerhalb weniger Minuten nach dem Training Proteine synthetisiert werden; sonst gehen die neu erworbenen Fertigkeiten wieder verloren.

Zur Synthese eines Proteins erzeugen Enzyme von der DNA-Sequenz des entsprechenden Gens im Zellkern zunächst Abschriften in Form so genannter Boten- oder mRNAs (Transkription). Diese wandern in das Zytoplasma, wo sie als Baupläne für die Synthese der zugehörigen Proteine dienen (Translation). Die frühen Gedächtnisforscher hatten in ihren Experimenten diese beiden Vorgänge blockiert und die Auswirkung auf das Merkvermögen der Tiere untersucht. Wie sich zeigte, konnten sich bei unterbundener Transkription oder Translation keine Informationen dauerhaft im Gehirn verankern, während das Kurzzeitgedächtnis unbeeinflusst blieb.

Da jedes Neuron Zehntausende von synaptischen Kontakten bilden kann, für die nicht jeweils ein eigenes Gen existiert, stellte sich die Frage, wie die Zelle die selektive Potenzierung individueller Synapsen bewerkstelligt. Eine nahe liegende Hypothese besagte, dass die Kontaktstelle bei ausreichender Stimulation ein noch unbekanntes intrazelluläres Signalmolekül freisetzt. Es wandert in den Zellkern und kurbelt über die Aktivierung bestimmter Gene die Synthese von Proteinen an, die dann aus der temporären eine dauerhafte Potenzierung der Synapse machen. Allerdings stellt sich die Frage, wie das Verstärkerprotein unter Tausenden von Kontaktstellen diejenige findet, die seine Synthese veranlasst hat.

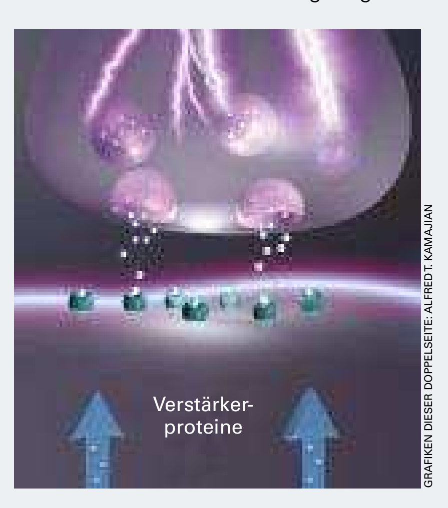
Mitte der 1990er Jahre bot sich schon ein detaillierteres Bild. Mehrere Neurowissenschaftler hatten gezeigt, dass ein Transkriptionsfaktor namens Creb bei der Konsolidierung flüchtiger Gedächtnisinhalte eine wesentliche Rolle spielt – und das bei so unterschiedlichen Tieren wie Fliegen und Mäusen. Transkriptionsfaktoren sind Proteine, die durch Bindung an spezielle DNA-Sequenzen Gene ein- und ausschalten können. Creb startet also in Neuronen die Synthese von »Gedächtnisproteinen«, indem es die entsprechenden Gene aktiviert.

In einer Serie eleganter Experimente konnten Uwe Frey vom Leibniz-Institut für Neurobiologie und Richard G. M. Morris von der Universität Edinburgh zeigen, dass diese – noch unbekannten – Proteine individuelle Synapsen nicht gezielt ansteuern müssen (Spektrum der Wissenschaft 10/1997, S. 16). Sie können sich in der gesamten Zelle ausbreiten; denn nur diejenigen synaptischen Verbindungen, die bereits temporär aktiviert sind, reagieren auf sie und werden dauerhaft gebahnt. Allerdings blieb immer noch viel zu klären – so die Frage, welches das hypothetische Signalmolekül



An der Axonendigung veranlasst der ankommende elektrische Impuls die Ausschüttung von Botenstoffen aus kleinen Speicherbläschen, den Vesikeln (oben). Diese so genannten Neurotransmitter durchqueren den synaptischen Spalt, der die Zellmembranen der beiden Nervenzellen trennt, und heften sich an Rezeptorproteine an der Oberfläche des Empfängerneurons. Dort lösen sie eine örtlich begrenzte Depolarisation der postsynaptischen Membran aus, was einer Spannungsänderung entspricht.

Nach mehrfacher Depolarisation der postsynaptischen Membran binnen kurzer Zeit ist die Empfindlichkeit der Synapse vorübergehend erhöht. Nachfolgende Signale erzeugen dann eine größere Spannungsänderung. Diese temporäre Potenzierung bildet die neurophysiologische Basis des Kurzzeitgedächtnisses. Damit sie permanent wird, müssen Verstärkerproteine im postsynaptischen Neuron synthetisiert werden (rechts). Deren genaue Wirkungsweise ist noch unklar. Vielleicht erhöhen sie, wie hier gezeigt, die Zahl der Rezeptoren oder verändern die postsynaptische Membran auf andere Art. Möglicherweise beeinflussen sie aber auch das Verhalten des präsynaptischen Neurons, indem sie etwa die Wiederaufnahme der Neurotransmitter aus dem synaptischen Spalt hemmen oder für eine stärkere Ausschüttung sorgen.



GRAFIKEN DIESER DOPPELSEITE: ALFRED T. KAMAJIAN

ist, das von der Synapse zum Zellkern wandert und dort den Transkriptionsfaktor Creb veranlasst, die Synthese der Proteine für die Langzeitpotenzierung in Gang zu setzen.

Parallele zwischen Gedächtnis und Hirnentwicklung

Bei diesem Stand der Dinge erkannten meine Kollegen und ich, dass wir uns letztlich mit denselben Problemen herumschlugen wie die Gedächtnisforscher – nur betrachteten wir sie aus einer anderen Perspektive. In meinem Labor am National Institute of Child Health and Human Development in Bethesda (Maryland) untersuchten wir, auf welche Weise bei der Embryonalentwicklung das Gehirn verschaltet wird. Während sich also die Gedächtnisforscher fragten, wie sinnliche Erfahrungen die Genaktivität derart beeinflussen, dass sich bestimmte synaptische Verbindungen dauerhaft verstärken, wollten wir wissen, wie Gene dafür sorgen, dass sich das komplizierte Netz aus Milliarden solcher Verbindungen im heranreifenden Gehirn überhaupt erst bildet.

Wir und andere Neurowissenschaftler, die sich mit der Entwicklung des Nervensystems befassten, hatten bereits vermutet, dass Sinneseindrücke bei der Verschaltung der Hirnneuronen eine wichtige Rolle spielen. Folglich würde das fetale Gehirn zunächst nach einem einfachen, genetisch vorgegebenen Plan verdrahtet. Während der anschließenden Reifung testet es anhand der eingehenden Stimuli dann alle Verbindungen auf Brauchbarkeit und behält nur die nützlichen, während die anderen eliminiert werden. Doch wie erkennt das Gehirn, welche Synapsen nützlich sind und bestehen bleiben sollen?

Schon 1949 formulierte der Psychologe Donald Hebb eine einfache Hypothese, wie Erfahrungen bestimmte neuronale Verschaltungen verstärken könnten. Inspiriert von Pawlows berühmtem Konditionierungsexperiment, postulierte er, dass Verbindungen zwischen zwei Neuronen dann potenziert werden, wenn beide Zellen gleichzeitig feuern. Bekanntlich gab der russische Forscher unmittelbar vor der Fütterung seines Hundes immer ein Glockenzeichen. Nach einer Weile genügte dieses Signal allein, den Speichelfluss des Tiers in Erwartung des Fressens anzuregen.

Vereinfacht ausgedrückt, müssten nach der Hebb'schen Regel also die Synapsen zwischen Neuronen im Hundehirn, die beim Glockenläuten feuern, und anderen, die beim Anblick von Futter Signale aussenden, verstärkt werden. So entstünde ein zellulärer Schaltkreis, der die Erfahrung widerspiegelt, dass die beiden Ereignisse zusammenhängen.

Nicht jedes Signal, das eine Nervenzelle empfängt, ist stark genug, diese ihrerseits zum Feuern zu veranlassen. Insofern ähnelt ein Neuron einem Mikrochip. Über seine Dendriten empfängt es Tausende von Signalen und integriert laufend deren Stärke. Anders als Computerchips, die viele Ausgänge haben, verfügt ein Neuron aber lediglich über einen einzigen, das Axon. Es hat deshalb nur zwei Möglichkeiten, auf die eingehenden Impulse zu reagieren: Entweder sendet es seinerseits ein Signal an die nachgeschaltete Zelle oder es bleibt stumm.

Empfängt eine Nervenzelle einen Impuls, verschiebt sich das elektrische Potenzial an der Membran des entsprechenden Dendriten geringfügig in positiver Richtung. Diese lokal beschränkte Spannungsänderung (Depolarisation) allein reicht aber noch nicht aus, das Neuron zu erregen. Feuern allerdings zahlreiche seiner Synapsen gleichzeitig, können sie gemeinsam das elektrische Potenzial so weit verschieben, dass die Nervenzelle ein so genanntes Aktionspotenzial erzeugt und damit das eingegangene Signal über ihr Axon an das nächste Neuron weiterleitet.

Wenn nur die synaptischen Verbindungen zwischen Neuronen, die gleich- ▷

zeitig feuern, verstärkt werden und somit erhalten bleiben, entsteht ein Verbund aus synchronisierten Zellen: ein so genanntes neuronales Netz. Wie Orchestermusiker, die den Takt nicht halten, fallen Neuronen, die unkoordiniert dazwischenfunken, unangenehm auf und werden – durch Kappen der Verbindungen – aus dem Ensemble entfernt. Nach dieser Theorie organisiert sich das Gehirn also selbst, indem es seine Neuronen gemäß dem Informationsfluss verschaltet. Dadurch wird die ursprüngliche, sehr allgemeine Architektur seiner Schaltpläne immer weiter verfeinert.

Soweit Hebbs bestechende Hypothese. Allerdings lässt sie offen, wie die postulierten Vorgänge konkret realisiert sind. Auf der Suche nach dem genauen Mechanismus stößt man erneut auf das Faktum, dass die Enzyme und Proteine, die synaptische Verbindungen verstärken oder löschen, nur dann synthetisiert werden, wenn die entsprechenden Gene aktiv sind. Welches Signal aber schaltet diese Gene an? Das herauszufinden nahmen wir uns seinerzeit vor.

Auf den Rhythmus kommt es an

Da Informationen im Gehirn in Form von Mustern neuronaler Aktivität repräsentiert sind, war meine Ausgangshypothese, dass eben solche Impulsmuster darüber entscheiden, ob die betreffenden Gene ein- oder ausgeschaltet werden. Um diese Vermutung zu testen, isolierte Kouichi Itoh, ein Postdoktorand in meinem Labor, Neuronen aus Mäusefeten und transferierte sie in Kulturschalen, wo wir sie mit feinen Elektroden stimulieren konnten. Wir erzeugten verschiedene Muster von Aktionspotenzialen und bestimmten jeweils die mRNA-Spiegel von Genen, die bekanntermaßen bei der Ausbildung neuronaler Schaltkreise und ihrer Anpassung an den sensorischen Input von Bedeutung sind.

Dabei fanden wir unsere Ausgangshypothese bestätigt: Wir konnten die betreffenden Gene anschalten, indem wir den Rhythmus der Elektrostimulation geeignet wählten – ähnlich wie man im Radio einen bestimmten Sender hereinbekommt, wenn man die entsprechende Frequenz einstellt.

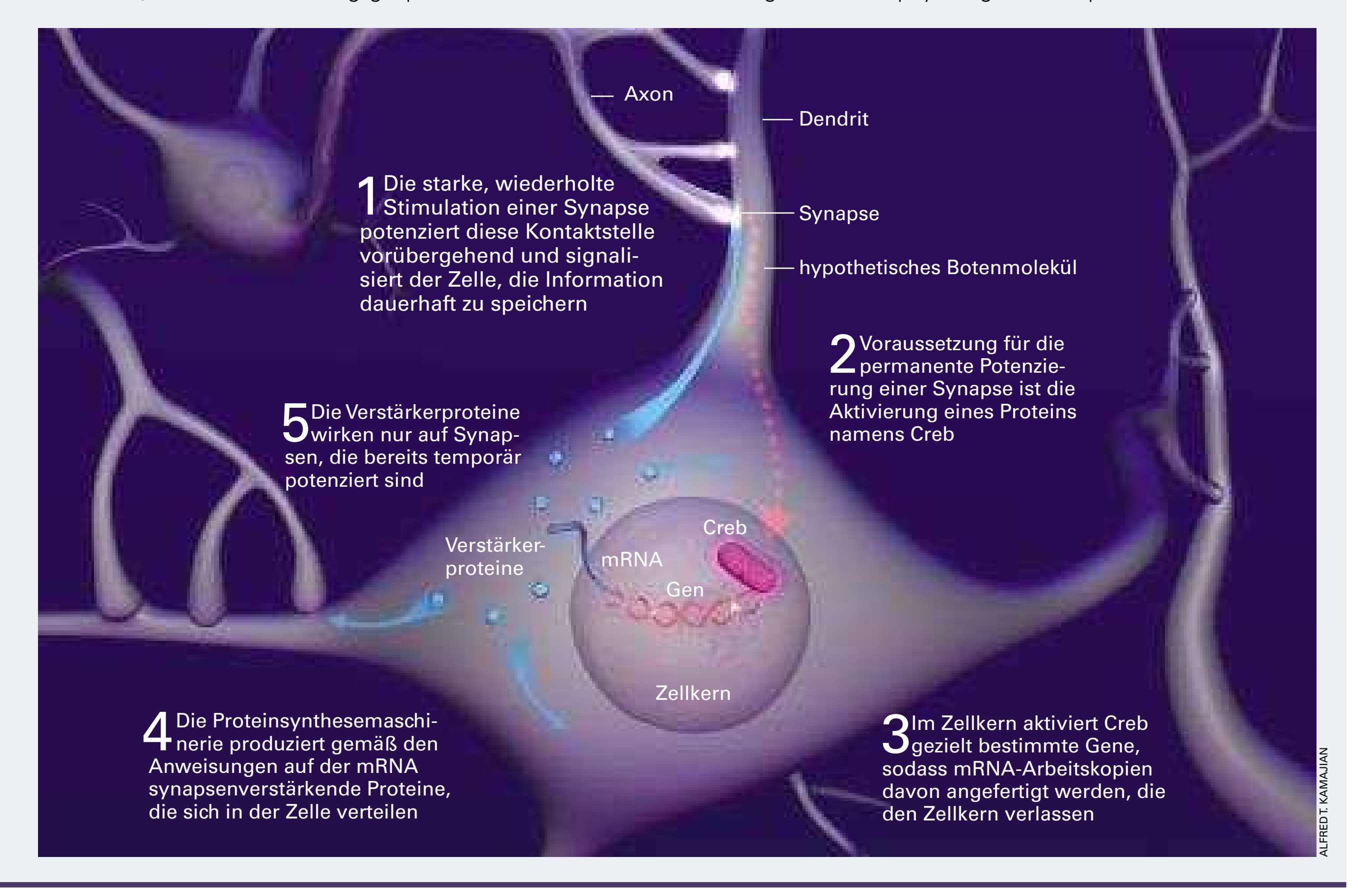
Nachdem wir also beobachtet hatten, dass bestimmte Gene in Nervenzellen tatsächlich über die neuronalen Impulsmuster reguliert werden, stellte sich uns eine wesentlich schwierigere Frage: Wie kön-

Gene und Langzeitgedächtnis

Dass zur Bildung permanenter Gedächtnisinhalte Gene aktiviert und Proteine synthetisiert werden müssen, ist schon seit den 1960er Jahren bekannt. Diese Erkenntnis warf jedoch Fragen auf, die jahrzehntelang unbeantwortet blieben.

Woher »weiß« ein Gen, wann es Proteine generieren soll, die bestimmte Synapsen verstärken, und wann es inaktiv bleiben muss, damit die kurzfristig gespeicherten Informationen wieder gelöscht werden? Gibt es ein spezielles Signalmolekül zur Kommunikation zwischen Synapse und Zellkern, das diese Botschaft vermittelt? Und wer oder was sagt den Verstärkerproteinen, welche unter den Tausenden von Synapsen sie potenzieren sollen?

Die ersten Antworten ergaben sich Mitte der 1990er Jahre aus eleganten neurophysiologischen Experimenten.



nen elektrochemische Vorgänge an der Außenmembran die Genexpression tief im Zellkern steuern? Auf der Suche nach der Antwort mussten wir das Zytoplasma unter die Lupe nehmen und nachsehen, auf welchem Weg die Information von der Membran zum Zellkern gelangt.

Was wir fanden, war keine einzelne Signalkette, sondern ein komplexes Netzwerk biochemischer Prozesse. Wie das Gewirr der Straßen, die letztlich alle nach Rom führen, gab es viele sich verzweigende, kreuzende und überschneidende Wege, auf denen das Signal von der Oberfläche in den Kern der Zelle gelangen konnte. Offenbar fand die über Impulsfrequenzen kodierte Information durch dieses Straßengewirr im Zytoplasma zu ihrem Bestimmungsort. Aber wie? Das war das große Geheimnis.

Der erste Schritt bei der Umsetzung des elektrischen Zustands der Membran in eine biochemische Reaktionskaskade ist der Einstrom von Kalziumionen durch spannungsgesteuerte Membrankanäle. Neuronen halten die Kalziumkonzentration in ihrem Innern extrem niedrig – sie beträgt dort nur etwa ein 20000stel derjenigen im extrazellulären Raum. Erreicht das Membranpotenzial eine kritische Schwelle, sodass die Zelle feuert, öffnen sich zugleich vorübergehend die Kalziumkanäle. Die Kopplung eines Aktionspotenzials mit einem kurzen Kalziumeinstrom übersetzt also den elektrischen Code in einen chemischen, der für die biochemische Maschinerie im Innern der Zelle verständlich ist.

Im weiteren Verlauf kommt es zu einer Art Dominoeffekt. Die einströmenden Kalziumionen aktivieren so genannte Proteinkinasen, die daraufhin Phosphatgruppen an andere Enzyme anhängen. Wie Staffelläufer, die nach Übergabe der Stafette losrennen, erwachen diese durch die Phosphorylierung aus ihrem Wartezustand und aktivieren ihrerseits Transkriptionsfaktoren wie Creb, indem sie die Phosphatgruppe an sie weiterreichen. Allerdings verfügt eine Zelle über Hunderte solcher Faktoren und etwa ebenso viele Kinasen. Wir wollten wissen, welche davon nach einer Serie von Aktionspotenzialen mit bestimmter Frequenz und den resultierenden Kalziumströmen am Staffellauf teilnehmen und schließlich genau die richtigen Gene anschalten.

Dazu brachten wir in die Neuronen Farbstoffe ein, die grün fluoreszieren,

▶ **Ein Farbstoff lässt Kalziumionen im Querschnitt eines Neurons grün leuchten; der Zellkern in der Mitte erscheint dunkel (oben). Mit einem konfokalen Lasermikroskop verfolgte der Autor den Einstrom des Erdalkalimetalls nach einer Serie von Aktionspotenzialen. Entlang einer Linie (rot oben) maß er in Abständen von zwei Millisekunden die Kalziumkonzentration und fügte diese Momentaufnahmen aneinander (unten). So ergab sich eine Art Zeitrafferbild, das zeigt, wie das Kalzium bis in den Zellkern vordringt.**

Aktionspotenzial
250 Millisekunden
500 Millisekunden
750 Millisekunden
1000 Millisekunden

F. ESHETE & R.D. FIELDS, JOURNAL OF NEUROSCIENCE, SEPT. 1, 2001, BD. 21, NR. 17; SOCIETY FOR NEUROSCIENCE

wenn die Kalziumkonzentration im Zellinnern steigt. So konnten wir verfolgen, wie das Muster der Aktionspotenziale in dynamische Schwankungen des intrazellulären Kalziumspiegels übersetzt wird. Eine einfache Möglichkeit wäre, dass die Gesamtmenge an Kalzium in einem Neuron die Genexpression reguliert, indem verschiedene Gene auf unterschiedliche Kalziumspiegel ansprechen. Was wir herausfanden, war jedoch raffinierter: Nicht die Kalziumkonzentration an sich steuert die Genaktivität, sondern ihr Schwankungsmuster, das dem zeitlichen Verlauf der Aktionspotenziale folgt.

Der Zeitfaktor entscheidet

Feleke Eshete, ein weiterer Postdoktorand in meinem Labor, untersuchte die Weiterleitung dieser Kalziumsignale zu den davon aktivierten Kinasen und zu den Transkriptionsfaktoren, die wiederum von diesen Enzymen reguliert werden. Und so begannen wir schließlich zu verstehen, wie die Information der neuronalen Impulsmuster über verschiedene intrazelluläre Signalkaskaden zielgerichtet zu bestimmten Genen gelangen könnte. Der entscheidende Faktor ist demnach die Zeit.

Nach unseren Erkenntnissen lässt sich der Informationsfluss von der Zellmembran zur DNA nicht als einfache Abfolge chemischer Reaktionen auffassen. Auf jeder Stufe, angefangen beim Einstrom von Kalzium durch die Membran, verzweigt sich die Signalkette zu einem komplexen Netzwerk miteinander verknüpfter Pfade. Jeder davon unterliegt engen Begrenzungen bei der Reaktionsgeschwindigkeit, die bestimmen, wie gut er auf unterschiedliche Impulsfolgen anspricht. Dadurch wird festgelegt, auf welchem Weg ein Signal, das aus einer Serie von Aktionspotenzialen einer bestimmten Frequenz resultiert, zum Zellkern gelangt.

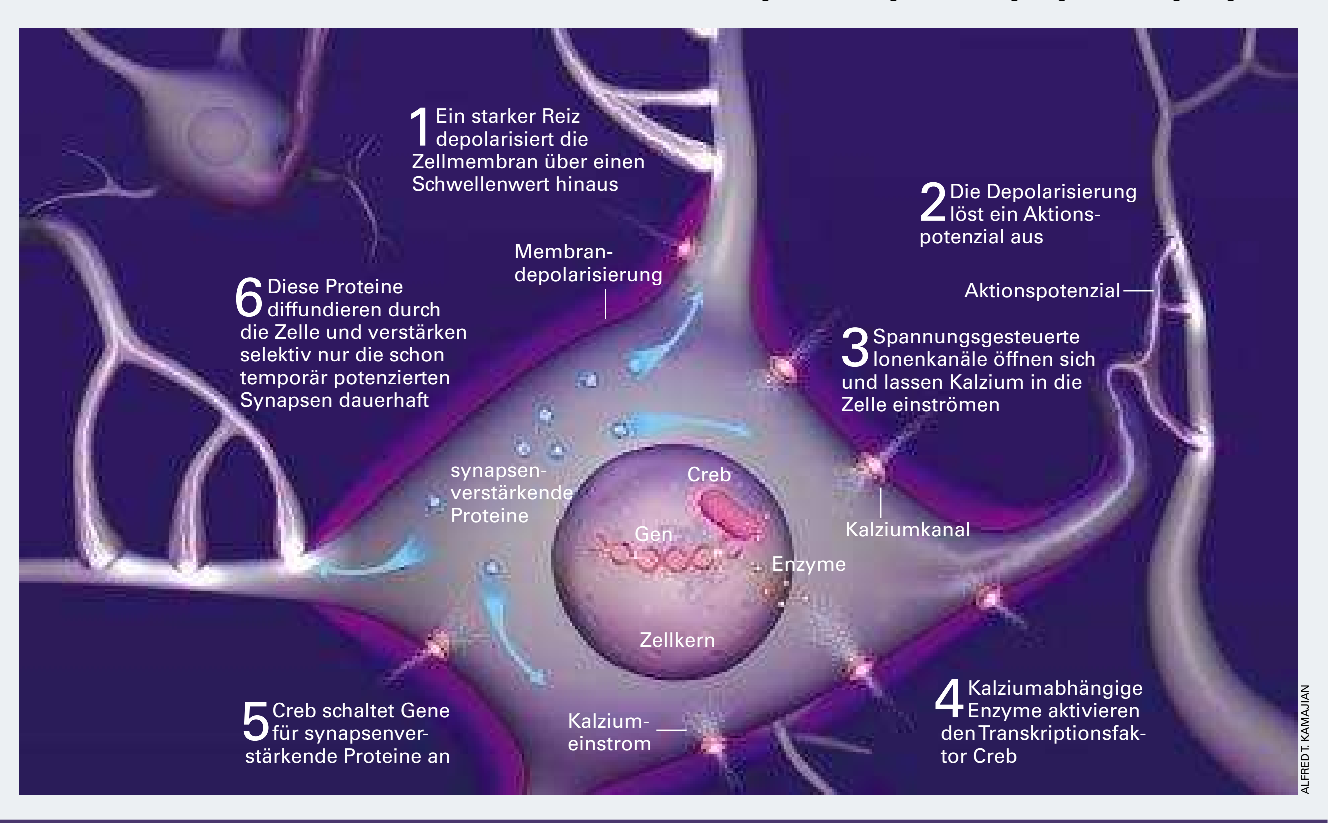
Manche Signalkaskaden reagieren schnell und kehren ebenso rasch in ihren Ausgangszustand zurück. Dadurch können sie einerseits hochfrequenten Impulsmustern folgen, andererseits ihre Aktivierung aber nicht lange genug aufrechterhalten, um auch auf Salven von Aktionspotenzialen anzusprechen, die in großen zeitlichen Abständen auftreten. Andere Signalkaskaden wiederum verhalten sich ausgesprochen schwerfällig, sodass sie auf hochfrequente Impulsfolgen nicht rasch genug reagieren können. Dank ihrer Trägheit aber bleiben sie nach einem Aktionspotenzial auch dann noch bis zum nächsten Impuls aktiv, wenn dieser erst nach einer Weile auftritt. Gene, die über solche Pfade reguliert werden, sollten demnach auf Stimuli ansprechen, die regelmäßig, aber in größerem zeitlichem Abstand auftreten. Das gilt zum Beispiel für wiederholtes Training zum Erlernen motorischer Fertigkeiten wie Fahrradfahren.

Anders gesagt stellten wir fest, dass sich Signale mit verschiedenen zeitlichen Mustern ausschließlich über solche Pfade fortpflanzen, deren Reaktionsverhalten auf das betreffende Muster abgestimmt ist. Am Ende werden so nur bestimmte Transkriptionsfaktoren und mithin Gene aktiviert. Unsere Messungen ergaben zum Beispiel, dass Creb schnell auf Salven von Aktionspotenzialen anspricht, aber nach dem Ende der Stimulation nur ▷

Woher wissen Gene, wann eine Synapse zu verstärken ist?

Experimente des Autors zeigen, dass für das Langzeitgedächtnis kein Botenstoff nötig ist, der Informationen von den Synapsen zum Zellkern überträgt. Bei starker Stimulation – durch wiederholte Reizung einer einzelnen oder gleichzeitige Polarisation mehrerer Synapsen – löst das Neuron ein Aktionspotenzial aus, das über spannungsgesteuerte Ionenkanäle Kalzium einströmen lässt. Letzteres veranlasst Enzyme, den Transkriptionsfaktor Creb zu aktivieren. Der wiederum schaltet Gene an, auf denen die Bauanleitung für synapsenverstärkende Proteine verschlüsselt ist.

Der Zellkern »hört« also nicht auf die an den Synapsen eintreffenden Nervensignale selbst, sondern nur darauf, ob das Neuron als Reaktion darauf seinerseits feuert. Erst in diesem Fall wird er aktiv und produziert Proteine zur dauerhaften Verstärkung von temporär potenzierten Synapsen, wodurch eine kurzfristige Erinnerung in das Langzeitgedächtnis gelangt.



ALFRED T. KAMAJIAN

▷ langsam wieder in der Ruhezustand zurückkehrt. Stattdessen bleibt es über mindestens dreißig Minuten aktiv, also lange genug, um Intervalle zwischen Übungseinheiten zu überbrücken, in denen wir neue Fertigkeiten oder Fakten lernen.

Kalziumeinstrom als Signal

Nun war ja schon länger bekannt, dass Creb bei der Festigung synaptischer Verbindungen, das heißt bei der Übertragung von Informationen aus dem Kurz- in den Langzeitspeicher, eine wichtige Rolle spielt. Deshalb fragten wir uns, ob der Mechanismus zur Signalübertragung zwischen Zellmembran und -kern, den wir im Rahmen der Hirnentwicklung aufgedeckt hatten, nicht auch für das Gedächtnis von Bedeutung sein könnte. Wir beschlossen, dieser Vermutung nachzugehen.

Präpariert man aus dem Gehirn einer Maus das Areal, das dem bei H. M. entfernten entspricht, und hält es in einem Nährmedium am Leben, kann man mit Mikroelektroden und elektronischen Verstärkern die elektrischen Potenziale individueller Synapsen auf einzelnen Nervenzellen ableiten. Wenn man eine solche Kontaktstelle mit einer schnellen Folge von Impulsen stimuliert, wird sie verstärkt. Dies bedeutet, dass sie auf nachfolgende Reize mit etwa doppelt so hohen Potenzialen reagiert wie auf die ursprüngliche Anregung.

Dieses als Langzeitpotenzierung (LTP) bezeichnete Phänomen kann ungeachtet seines Namens recht kurzlebig sein. Verabreicht man der Synapse nach der Hochfrequenzanregung in größeren Abständen einzelne Testimpulse, nimmt die Höhe der Aktionspotenziale mit der Zeit ab und kehrt innerhalb weniger Stunden auf das ursprüngliche Niveau zurück. Diese vorübergehende Verstärkung der synaptischen Antwort – Neurologen sprechen von früher LTP – ist ein zelluläres Modell für das Kurzzeitgedächtnis.

Wenn man dagegen die ursprüngliche Hochfrequenzanregung mehrfach (in unserem Fall dreimal) wiederholt, wird die Synapse dauerhaft potenziert. Dieser Effekt heißt späte LTP. Allerdings tritt er nur auf, wenn die Intervalle zwischen den Anregungen nicht zu kurz sind (in unseren Experimenten mindestens zehn Minuten). Auch wenn man Hemmstoffe der mRNA- oder Proteinsynthese in das Nährmedium gibt, verschwindet die Potenzierung trotz mehrfacher Hochfrequenzanregung innerhalb weniger Stunden. Wie beim intakten Tier funktioniert das Kurzzeitgedächtnis im zellulären Mo-

dell also unabhängig vom Zellkern, während das Langzeitgedächtnis nicht ohne Proteinsynthese auskommt.

Mit der gleichen Methode hatten schon Frey und Morris gezeigt, dass Proteine, die eine späte LTP bewirken, jede bereits temporär gebahnte Synapse eines Neurons permanent verstärken können. Sie stimulierten dazu zunächst eine einzelne Kontaktstelle, um eine kurzfristige Potenzierung auszulösen, die normalerweise nur einige Stunden anhält. Dann reizten sie eine zweite Synapse desselben Neurons mit einem Impulsmuster, das eine späte LTP induziert – drei hochfrequenten Stimuli im Abstand von je zehn Minuten. Das Ergebnis: Nicht nur diese Kontaktstelle wurde permanent potenziert, sondern auch die andere. Der intensive zweite Reiz sandte offenbar ein Signal zum Zellkern und veranlasste dort die Synthese von Verstärkerproteinen, die dann auf alle vorgeprägten Synapsen wirkten.

Vor dem Hintergrund unserer Arbeiten zum Zusammenhang zwischen Impulsmustern und Genaktivierung und eingedenk der Hebb'schen Hypothese, wonach das Feuern eines Neurons bestimmt, welche seiner synaptischen Verbindungen verstärkt werden, stellten wir uns die Frage, ob zur langfristigen Speicherung von Informationen tatsächlich ein Signalmolekül von der dendritischen Membran zum Zellkern wandern muss. Wenn nämlich die Spannungsänderungen an einer oder mehreren gleichzeitig erregten Synapsen stark genug sind, um ein Aktionspotenzial am Axon auszulösen, strömen Kalziumionen durch spannungsgesteuerte Kanäle am Zellkörper selbst ein und könnten von dort aus zum Beispiel über Creb die Genexpression im Kern aktivieren.

Um diese Hypothese zu testen, injizierten die Postdoktorandin Serena Dudek und ich in einen Hirnschnitt einen Stoff, der die Signalübertragung an Synapsen blockiert. Dann regten wir die Neuronen zum Feuern an, indem wir ihren Zellkörper und ihr Axon direkt elektrisch reizten. Die Nervenzellen produzierten also Aktionspotenziale, während ihre Synapsen stumm blieben. Falls Letztere mit dem Zellkern kommunizieren müssten, um eine dauerhafte Potenzierung hervorzurufen, dürfte eine permanente Verstärkung bei unserem Versuch nicht möglich sein. Wären es jedoch die Aktionspotenziale selbst, die eine Genexpression im Zellkern in Gang setzen, wie wir es bei unseren Studien zur Entwicklung des Gehirns beobachtet hatten, sollte die Blockade der Synapsen keinen negativen Einfluss haben.

Was von beidem traf zu? Um die Antwort zu finden, untersuchten wir das Hirngewebe auf Aktivierung von Creb. Das Ergebnis war eindeutig: In dem kleinen Areal, in dem wir ohne jegliche Synapsenstimulation Aktionspotenziale ausgelöst hatten, lag der Transkriptionsfaktor durchweg im phosphorylierten, also aktivierten Zustand vor. Außerdem prüften wir das Gen *zif268*, dessen Expression gleichfalls mit der späten LTP und der Aufnahme von Informationen ins Langzeitgedächtnis zusammenhängt. Wie wir feststellten, wurde es wie Creb ohne synaptische Stimulation durch Aktionspotenziale in Hippocampusneuronen aktiviert.

Wie das Gehirn merkwürdige Informationen erkennt

Wir machten auch die Gegenprobe und führten das gleiche Experiment in Gegenwart einer Substanz durch, die spannungsgesteuerte Kalziumkanäle blockiert – die wir als die eigentliche Quelle des Signals zum Zellkern identifiziert hatten. Tatsächlich wurde Creb in diesem Fall ebensowenig phosphoryliert wie die Proteinkinase MAPK, die ebenfalls mit der späten LTP in Verbindung steht. Auch das Gen *zif268* blieb ausgeschaltet.

Diese Ergebnisse zeigten klipp und klar, dass auch bei der Gedächtnisbildung kein Botenstoff von der Synapse zum Kern wandern muss. Wie wir schon in unseren entwicklungsbiologischen Experimenten beobachtet hatten, öffnet das Aktionspotenzial Kalziumkanäle in der Zellmembran der Neuronen und aktiviert damit Signalketten, die eine Expression der erforderlichen Gene induzieren.

Diese Parallele zwischen Gedächtnis und Hirnreifung erscheint durchaus plausibel. In beiden Fällen geht es ja um die Verstärkung von Synapsen. Dabei reagiert die Transkriptionsmaschinerie im Zellkern nicht auf die Botschaften jeder einzelnen solchen Kontaktstelle, sondern beginnt nur auf das integrierte Ausgangssignal des Neurons hin mit der Synthese von Proteinen, die eine späte LTP bewirken.

Zwar können wir nicht mit letzter Sicherheit ausschließen, dass bei der Festigung einer Gedächtnisspur bisher unbekannte Moleküle als Botschafter zwischen Synapsen und Zellkern fungieren. Unseren Experimenten nach werden sie aber nicht benötigt. Wie von Hebb postuliert, sind die Aktionspotenziale, die aus der Integration aller synaptischen Eingangsignale resultieren, entscheidend für die langfristige Speicherung von Gedächtnisinhalten.

All diese Befunde können sehr gut erklären, wie unser Gedächtnis im Alltag funktioniert. Meist wissen wir zunächst nicht, welche Ereignisse permanent gespeichert werden sollten und welche nicht. Um mit dem Hier und Jetzt zurechtzukommen, müssen wir kurzfristig vielerlei Informationen aufnehmen, die wir schon bald wieder vergessen können. Dafür genügt die vorübergehende Potenzierung einzelner Synapsen. Gewinnt ein Erlebnis jedoch durch seine Intensität oder stetige Wiederholung an Bedeutung, führt es zur synchronen Depolarisierung zahlreicher Synapsen und löst so wiederholt Aktionspotenziale aus. Diese zeigen an, dass das betreffende Ereignis aufgezeichnet zu werden verdient. Die entsprechenden Gene springen an und Verstärkerproteine etablieren eine Langzeitpotenzierung an eben den Synapsen, die an der kurzfristigen Speicherung beteiligt waren: Die zunächst noch flüchtige Gedächtnisspur wird für alle Zeiten ins Gehirn eingebrannt. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



R. Douglas Fields leitet die Abteilung für Entwicklung und Plastizität des Nervensystems am National Institute for Child Health and Human Development in Bethesda (Maryland). Zudem ist er Professor für Neuro- und Kognitionswissenschaften an der Universität von Maryland in Baltimore. Kürzlich beschrieb er in Spektrum die »unbekannte Seite des Gehirns« (9/2004, S. 46).

Memory systems of the brain: a brief history and current perspective. Von Larry R. Squire in: Neurobiology of Learning and Memory, Bd. 82, S. 171, November 2004

Somatic action potentials are sufficient for late-phase LTP-related cell signaling. Von Serena M. Dudek und R. Douglas Fields in: Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Bd. 99, S. 3962, 19. 3. 2002

Synaptic tagging and long-term potentiation. Von Uwe Frey und Richard Morris in: Nature, Bd. 385, S. 533, 6. 2. 1997

Regulation of the neural cell adhesion molecule L1 by specific patterns of neural impulses. Von K. Itoh et al. in: Science, Bd. 270, S. 1369, 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Trickreiche Tauchboote

Hunderte Schüler tüftelten in Berlin um die Wette. Der Wettbewerb »explore physics« und das Wissenschaftsfestival »Highlights der Physik« standen in diesem Jahr im Zeichen von Einstein.

Von Sven Titz

Der sonnige Innenhof des Berliner Veranstaltungszentrums »Urania« ist mit mehreren hundert Schülern gut gefüllt. Zwei Wettbewerbsteilnehmer tragen ihre Wasserrakete in die Mitte: eine gewöhnliche Plastikflasche mit Flügeln und einem Tennisball obenauf, um den Aufprall bei der Rückkehr zur Erde zu dämpfen. Die Rakete wird zu einem Drittel mit Wasser gefüllt und mit Druckluft aufgepumpt. Im Innern darf maximal ein Druck von fünf Atmosphären herrschen.

»Drei, zwei, eins, los!« Das heraussprühende Wasser nebelt die Raketenbauer ein, während ihr Werk gen Himmel saust. Ein paar studentische Hilfskräfte am äußersten Rand des Innenhofs verfolgen die Flugbahn besonders aufmerksam. Sie sollen durch Triangulation aus den Beobachtungswinkeln die Maximalhöhe bestimmen. Das ist nicht ganz einfach: Die Rakete fliegt erst senkrecht hoch, dann im Bogen auf das Dach eines angrenzenden Gebäudes. Beifall brandet auf, denn die erreichte Höhe ist mit gut dreißig Metern überdurchschnittlich. »Alle Raketen auf dem Dach werden später heruntergeworfen, ihr bekommt sie dann wieder«, beruhigen die Organisatoren.

Das Wasserraketen-Wettfliegen war nur eine von sieben Disziplinen, in denen im Juni dieses Jahres der Schülerwettbewerb mit dem anglophilen Namen »explore physics« ausgetragen wurde. Aus der ganzen Bundesrepublik waren mehr als 270 Teams mit insgesamt rund 850 Schülern der 5. bis 13. Klasse angereist, um ihre Wasserraketen, Papierbrücken, Tauchboote und Kettenreaktionen im Wettkampf zu testen. Mehr als 200 Lehrer haben die Schüler betreut – und manchmal vielleicht ein klitzekleines bisschen mitgeholfen. Die Jury bewertete nicht nur die genaue Erfüllung der Aufgabenstellung, sondern auch die Originalität und das Design der Bastelprodukte. Viele Wettkampfteilnehmer werkelten darum wochenlang an ihren Geräten. Nach all der Mühe winkten – neben der Reise nach Berlin – zahlreiche Preise in Form von Zeitschriftenabonnements, Buchgutscheinen, Puzzles und Experimentierkästen.

Die ersten drei Plätze für die Wasserraketen gingen an Gruppen, deren sprühende Plastikflaschen bis in eine Höhe von mehr als 100 Metern emporsausten – angetrieben allein durch den Rückstoß der herausschießenden Wassertröpfchen. Der Schlüssel zum Erfolg lag vor allem in einer leichten Bauweise. Viele Raketenbauer verwendeten das Ventil eines Gartenschlauchs. Das ist zwar praktisch, bremst aber wie ein Klotz hochfliegen-

Die Jury begutachtet Papierbrücken (links); heftig spritzend steigt die durch Schwanzflossen stabilisierte Wasserakete himmelwärts (rechts).



BEIDE FOTOS: SVEN TITZ



Physikalische Höhepunkte und ein Wettbewerb

Es traf sich gut, dass im Juni dieses Jahres in Berlin Wissenschaftssommer war. An dem munteren Treiben um Albert Einstein beteiligten sich naturgemäß die Physiker besonders intensiv.

Mehr als 12 000 Neugierige besuchten die »Highlights der Physik« und bauten sicherlich manche Berührungsangst ab. Das Wissenschaftsfestival wird von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung durchgeführt und gastiert seit 2001 jedes Jahr in einer anderen Stadt (bisher München, Duisburg, Dresden und Stuttgart). Das diesjährige Motto »Zeit – Licht – Zufall« verweist auf das Einsteinjahr: Vor 100 Jahren legte der damalige Angestellte beim Berner Patentamt seine bahnbrechenden Arbeiten zu Raum und Zeit, zum Photoeffekt (Licht) und zur Brown'schen Molekularbewegung (Zufall) vor.

Was alles aus Einsteins Entdeckungen folgte, machte eine Ausstellung anschaulich. So konnten sich die Besucher auf einen Drehteller stellen, der mit Hilfe supraleitender Magnete praktisch reibungslos in der Luft schwebte. Alte Uhrexponate faszinierten durch eigenartige Pendelmechanismen, etwa eine Wippe, auf der unermüdlich eine Kugel hin- und herrollte. Für den neuartigen 3-D-Bildschirm, der in der Ausstellung präsentiert wurde, benötigt der Betrachter keine ulkige Farbbrille mehr – die Position seiner Augen wird per Kamera lokalisiert. Daraufhin verstellt sich ein Bildschirm mit Speziallinsen auf so raffinierte Weise, dass linkes und rechtes Auge Verschiedenes zu sehen bekommen. Dadurch entsteht ein räumliches Bild, etwa ein Elefant, der sich sogar spielerisch per Fingerzeig drehen lässt.

Zusätzlich zur Ausstellung fanden mehrere Vorträge statt, zum Beispiel über die Physik in der Fernsehserie »Star Trek« oder die Eigenschaften von Sand. In einer Einkaufsgalerie am Potsdamer Platz gab es physikalische Experimente zum Mitmachen. Und im Friedrichstadtpalast begeisterte eine Wissenschaftsshow mehr als 1900 Zuschauer. Der Fernsehmoderator Ranga Yogeshwar führte durch das Programm.

Der Schülerwettbewerb »explore physics«, der für dieses Jahr unter die Fittiche der »Highlights« schlüpfte, ist eine im Prinzip unabhängige Veranstaltung. In diesem Jahr wurde er von der Klaus Tschira-Stiftung und der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung unterstützt.

Wo die Highlights (www.physik-highlights.de) im kommenden Jahr stattfinden werden, ist noch ein Geheimnis. Der Schülerwettbewerb wird jedenfalls im Juli 2006 in Mannheim laufen, sagt der wissenschaftliche Leiter Axel Carl von der Universität Duisburg. Man kann sich rechtzeitig im Internet informieren: www.explore-physics.de.





BEIDE FOTOS: PRESSESTELLE DPG

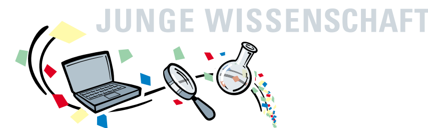
▲ **Elektrische Aufladung lässt dieser Besucherin der Ausstellung die Haare zu Berge stehen (oben); die Herren bewegen die Metallkugel mit der »Kraft ihrer Gedanken« (unten).**

Der Ursprung der physikalischen Populäraktivitäten liegt in der Mitte der 1990er Jahre. Um dem verkümmerten Interesse der Schüler an den Naturwissenschaften und den sinkenden Studentenzahlen aufzuhelfen, wurden verschiedene Gemeinschaftsinitiativen gegründet; aus ihnen sind unter anderem der Wissenschaftssommer, der Schülerwettbewerb und die »Highlights« hervorgegangen. Zufall oder nicht – die Studentenzahlen in der Physik gingen in den vergangenen Jahren stetig nach oben.

---

dere Träume aus. Auch eine Startrampe zum genau senkrechten Abschießen und die Stabilisierung in der Luft mit Hilfe von Seitenflügeln tragen zum Erfolg bei. Die Gewinner aus Horb am Neckar verwendeten eine ziemlich kleine Flasche, die nicht einmal einen Liter Flüssigkeit fasste und mit Flügeln aus leichtem Balsaholz ausgestattet war. Ihre Rakete schoss 113 Meter hoch und landete dicht neben dem Abschusspunkt. Die Flügel splitterten zwar beim Aufprall am Boden in alle Richtungen davon, aber der Sieg war dem Team nicht zu nehmen. Das Erfolgsrezept lautet: »So einfach wie möglich bauen.«

Die Organisatoren des Wettbewerbs hatten angeregt, man könne ja auch über eine mehrstufige Rakete nachdenken. So eine Konstruktion war den Schülern vom Neckar »viel zu kompliziert« und den meisten anderen Teilnehmern auch. Nur eine einzige Gruppe hat die Anregung aufgegriffen: Cathrin Fischer, Frank Rettinger und Michael Bauer aus der 12. Klassenstufe einer Schule in Alzey nahe Mainz. Ihr Gerät flog zwar nur ▷

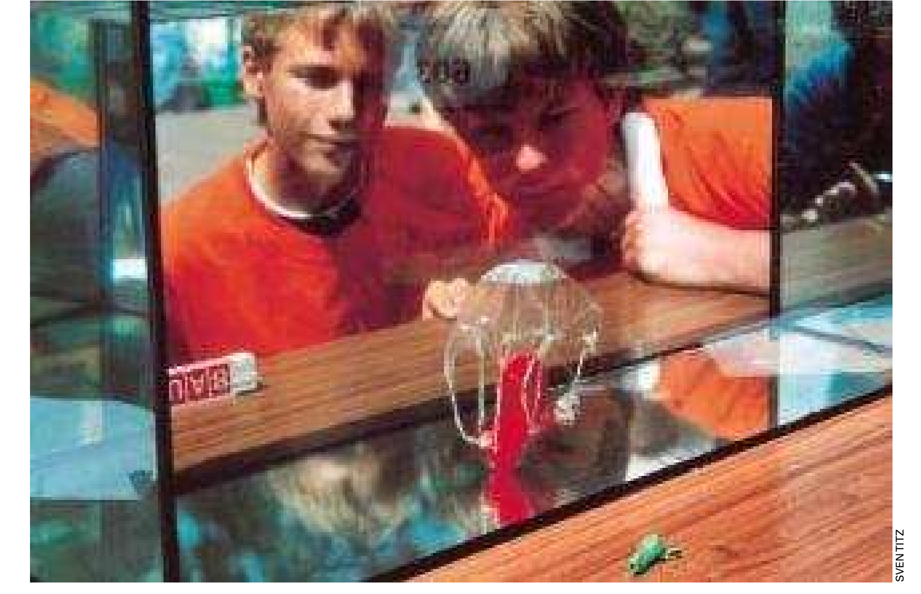


▷ um die zwanzig Meter hoch, aber ihre Konstruktion funktionierte. Die zwei Stufen der Rakete, beide aus Plastikflaschen, waren über einen Druck-Hebel-Mechanismus gekoppelt. Erst als die erste Stufe leer »gebrannt« war und der Druck darin sank, »zündete« die zweite Stufe, während die erste wie die großen Vorbilder in Baikonur oder Cape Canaveral zu Boden fiel. Ein Sonderpreis der Jury war der Lohn für die originelle Arbeit.

Weitaus geruhsamer als bei den Wasserraketen, die manchmal vor dem Abflug umkippten und dann auf dem Boden herumfauchten, ging es bei den Papierbrücken zu. Der Wettbewerb war aber nicht weniger ambitioniert. »Die drei Besten ähnelten im Design stark der Millennium Bridge in London«, sagt Cornelius Gahl, Jury-Mitglied und im normalen Leben Physiker an der FU Berlin. Die etwa einen Meter langen Brücken kamen mit äußerst wenig Material aus. Das beste Team baute ein Modell, das bloß 27,5 Gramm wog – außer Papier waren nur Bindfaden und Klebstoff erlaubt. Die Brücken mussten aber 700 Gramm in Gestalt einer Modelleisenbahn aushalten, die auf der Trasse hin- und herfuhr.

Heiße Luft im fußballförmigen Ballon

Wem das Basteln mit Papier zu trocken war, der konnte auch kleine Tauchboote bauen. Die Mini-U-Boote mussten für eine bis drei Minuten auf den Boden eines Aquariums oder Kinderplanschbeckens sinken und dann selbsttätig wieder auftauchen. Dafür ließen sich die Schüler mannigfaltige Mechanismen einfallen: Eine Gruppe entwarf ein elektrisch betriebenes Zählwerk, das sogar mehrfaches Ab- und Auftauchen gestattete. Drei Neunjährige aus Berlin bastelten ein Gefährt mit drei Stelzen, einem Korken für den Auftrieb und einem sandgefüllten Trichter. Nach dem Herausrieseln des Ballasts trudelte das Tauchboot wie geplant wieder an die Oberfläche. Zahlreiche Wettkämpfer erzeugten Auftrieb durch Gase, die sie durch chemische Reaktionen entstehen ließen – sei es die elektrolytische Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff, sei es die Reaktion von Natriumhydrogenkarbonat mit Zitronensäure, die Kohlendioxid freisetzt (siehe Bild oben). Es war erstaunlich, wie vielen Gruppen es gelang, die Regeln der Tauchfahrt genau einzuhalten.



SVEN TITZ

▲ Julian und Arne aus der 11. Klassenstufe vom Gymnasium in Trittau bei Hamburg beobachten ihr Tauchboot. Aus Natriumhydrogenkarbonat und Zitronensäure entsteht Kohlendioxid, wird mit dem »Fallschirm« aufgefangen und sorgt für den nötigen Auftrieb.

Einen noch viel stärkeren Auftrieb als die Mini-U-Boote erzeugten die Heißluftballons. An diese schwierige Aufgabe haben sich denn auch nur wenige Mutige herangetraut. Die Ballons auf den beiden ersten Plätzen konnten immerhin eine Auftriebskraft von gut zwei Newton vorweisen – genug, um zwei Tafeln Schokolade durch die Lüfte schweben zu lassen. Das Siegermodell bestach obendrein durch sein Design – es sah aus wie ein Fußball, pünktlich zum Beginn des Confederations Cup in Deutschland. Eine mit Heißluft gefüllte Kugel erreichte sogar einen Auftrieb von 5,6 Newton, wie per Federwaage festgestellt wurde. Nur dehnte sie sich beim Aufsteigen über die erlaubte Größe hinaus; ein Sonderpreis tröstete die Pechvögel ein wenig über den verpassten Sieg hinweg.

Heißluftballons und Tauchboote standen am ersten Wettbewerbstag auf dem Programm, Wasserraketen und Papierbrücken am zweiten. Am dritten Tag machten sich die Schüler an Kaleidoskope, leichtgängige Pendel und Kettenreaktionen. Bei den Letzteren galt es, nicht einfach nur Dominostein an Dominostein zu setzen, sondern vor allem, möglichst viele unterschiedliche physikalische Effekte aneinander zu reihen. Außerdem sollte das übergreifende Motto der ganzen Veranstaltung thematisiert werden: »Licht – Zeit – Zufall«. Gar nicht so einfach! Auf die immer wieder auftauchende, vorsichtige Frage der Jury, wo denn der Zufall in ihrem Wettbewerbsbeitrag sei, antworteten einige keck: »Na, es ist halt Zufall, ob alles funktioniert.«

Ob Glückssache oder nicht – es gab viele ideenreiche Effekte zu bestaunen. In einer Kettenreaktion aktivierte ein elektrischer Stromkreis einen Elektromagneten, der eine Kugel in ein Wasserbad fallen ließ. Das überlaufende Wasser trieb ein Mühlrad im Miniaturformat an. Dieses wiederum löste eine Murmel aus, die gegen Dominosteine rollte. Alles ging gut – die Steine fielen um und schlossen einen weiteren Stromkreis, und die Kettenreaktion setzte sich fort. Einige Gruppen dachten sich mehr als zwanzig verschiedene Effekte aus.

Eine Kettenreaktion erhoffen sich die Organisatoren auch von dem Wettbewerb und ganz allgemein von den »Highlights der Physik«, in die dieses Mal die Veranstaltung eingebettet war. Vielleicht würden ja die begeisterten Tüftler in wenigen Jahren auf den Geschmack kommen, Physik oder Ingenieurwissenschaften zu studieren. Noch ist unklar, wie viel die bisherigen Wettbewerbe gebracht haben, denn die entsprechenden Jahrgänge kommen ja erst nach und nach ins studierfähige Alter. Jedenfalls zeigt der Schülerwettbewerb, dass reichlich Ehrgeiz und Kreativität unter den Jugendlichen vorhanden ist. Und das gilt gewiss nicht nur dann, wenn es um Tauchboote und Raketen geht. ◁



Sven Titz ist promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

AUTOR

Die vielen Gesichter

Sonnenaufgang über Arabia Terra in Richtung der Region Utopia Planitia: Diese Illustration des Mars stützt sich auf Satellitenaufnahmen und zeigt die Ränder von Vastitas Borealis, einer ausgedehnten flachen Ebene, wo sich vielleicht einst Fluten aus alten Kanälen stauten. In der Bildmitte streifen die Sonnenstrahlen den Krater Lyot.

des Roten Planeten

Der eine Mars-Rover stieß auf eine alte Wüste, der andere entdeckte eine Welt, die einst voll Wasser gewesen sein muss.

Von Philip R. Christensen

Viele Menschen zieht es in die Wüste wegen der Ödnis und Einfachheit dort – ich gehe dahin, weil sie so komplex ist. Die Gesteine im Westen Arizonas, wo ich arbeite, enthüllen eine der verwickeltsten Vergangenheiten der Erde. Schichten aus Kalkstein, Quarzsand und erstarrter Lava zeigen, dass dieses Gebiet in den vergangenen 600 Millionen Jahren ein warmes, flaches Meer war, danach ein schlammiger Sumpf, eine riesige Wüste flirrend heißer Dünen, ein Gletscher und schließlich wieder ein flaches Meer. Vulkanausbrüche formten Inseln wie Japan, die wiederum entlang gewaltiger Bruchzonen 150 Kilometer auf den Kontinent geschoben wurden, die Gesteinsschichten umkippten und sie zu Marmor und Quarzit verkochten. Zuletzt schufen Hebungen und Erosion die Wüstenlandschaft, die wir heute vor uns sehen.

Eine ähnlich detaillierte Rekonstruktion der geologischen Geschichte war für den Mars lange Zeit nicht möglich. Im Lauf meines Lebens hat sich der Rote Planet jedoch von einem Lichtpunkt am Nachthimmel in etwas verwandelt, mit dem Menschen etwas anfangen können: ein Land hoher Vulkane, ausgetrockneter Flussbetten, uralter Seen und windgepeitschter Lavaebenen. Der Mars hat fraglos eine der interessantesten Entwicklungen im Sonnensystem hinter sich, von der Forscher bisher nur grobe Umrisse kannten. Jahrelang haben wir über die großen Fragen debattiert, ob der Mars einst »warm und feucht« und erdähnlich oder »kalt und trocken« und kahl wie der Mond war – so als ob man die Geschichte einer ganzen Welt auf ein einziges Schlagwort reduzieren könnte.

Im vergangenen Jahrzehnt hat jedoch die dritte Ära der Marsforschung begonnen: nach den Beobachtungen per Teleskop im 19. Jahrhundert und der ersten Erkundung mit Raumsonden in den 1960er und 1970er Jahren. Orbiter- und Rover-Missionen der jüngsten Zeit lieferten uns die Topografie des Planeten, die Oberfläche sowie seine Mineralogie so detailliert, dass man geologische Prozesse nachvollziehen konnte. Außerdem ließen sich die Daten aus der Umlaufbahn direkt mit Messungen am Boden verknüpfen. Der Mars ist endlich zu einem Ort geworden, den man als Geologe untersuchen kann, um in seinen Gesteinen, Mineralien und Landschaften die großen Zusammenhänge zu erkennen.

Wie warm? Wie feucht? Wie lange?

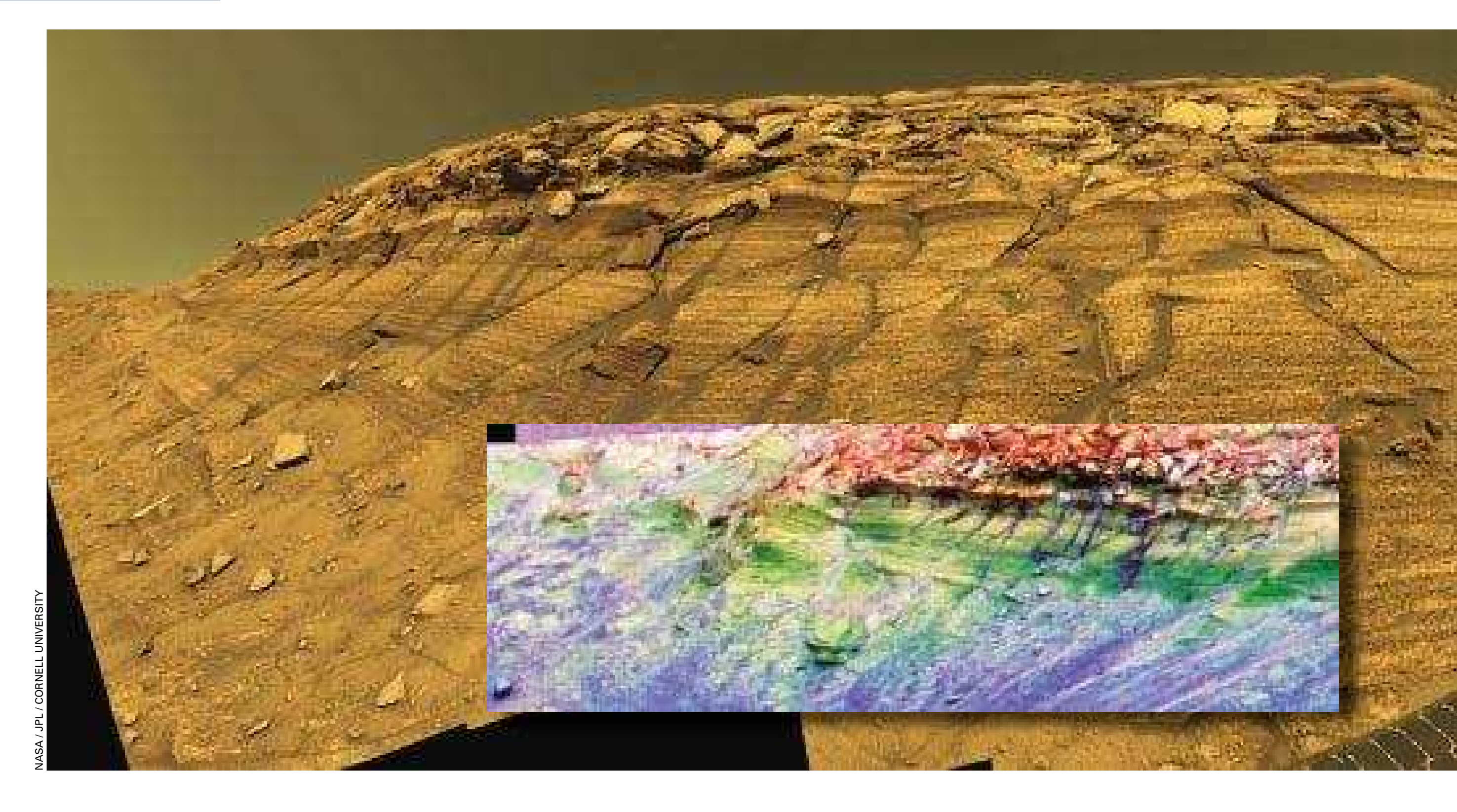
Dabei haben wir erkannt, dass unser Nachbarplanet im Lauf seiner Geschichte eine erstaunliche Vielfalt von Prozessen und Umweltveränderungen erlebt hat. Dieser Himmelskörper war mal knochentrocken, mal tropfnass, mal von Schnee und Eis bedeckt. Einfache Etiketten passen nicht mehr. Anstatt »kalt« oder »warm« fragen wir jetzt: Wie warm? Wie feucht? Wie lange? Wo genau? Und die Antworten spielen eine Schlüsselrolle bei dem ganz großen Rätsel, das viele von uns zur Erforschung des Mars zieht: sein Potenzial für Leben, jetzt oder früher.

Im Januar 2004 landete die Nasa an zwei sehr unterschiedlichen Stellen auf dem Roten Planeten je eine der kompliziertesten Maschinen, die jemals gebaut wurden. Bestückt mit Kameras und Spektrometern zur Analyse von Boden und Gestein sollten die Rover Spirit und Opportunity (Geist und Gelegenheit) die zentrale Frage der Marsgeologie beantworten: Was war die Rolle des Wassers? Spirit landete wie geplant im Krater Gusev, der wegen seiner Gestalt ausgewählt worden war. Bilder aus dem Orbit hatten schon früher gezeigt, dass sich in den Krater ein Tal, Ma'adim, öffnet, so als wäre Gusev selbst einst ein See gewesen.

Am Anfang enttäuschte die Landestelle eher: Spirit stieß auf keinerlei Spuren von einstigem Wasser. Stattdessen gab es Vulkangestein zu sehen, das nach den Spektrometerdaten aus Olivin und Pyroxen bestand – Mineralien, die schon bei der geringsten Anwesenheit von Wasser zerfallen würden. In den drei Milliarden Jahren, seitdem sie ausgeschleudert wurden, konnten sie keiner nennenswerten Wassermenge ausgesetzt gewesen sein. Die Sache wurde erst interessanter, als Spirit die Columbia Hills erklomm, die sich neben der Landestelle erheben. Hier fand der Rover eine große Menge Schwefelsalze. Offenbar war dort das Vulkangestein zu Körnchen zermahlen worden, die dann durch Salz zusammenbackten. Dieser Prozess könnte mit Wasser zu tun gehabt haben, das durch die Felsen sickerte; oder mit Schwefelsäure, welche mit Mineralien reagierte, die bereits im Gestein enthalten waren. Trotz der Hinweise auf Wasser enthielt dieses Gestein aber immer noch große Mengen Olivin und Pyroxen. Selbst am Grund eines mutmaßlichen Sees scheint also Wasser in den vergangenen Jahrmilliarden nur eine untergeordnete Rolle gespielt zu haben.

Der Rover Opportunity war in die Meridiani-Ebene geschickt worden, hauptsächlich – und zum ersten Mal – wegen ihrer Mineralien: Dieser Schritt sollte eine neue Phase in der Erforschung des Sonnensystems einleiten. Die ersten ▷

RON MILLER



NASA / JPL / CORNELL UNIVERSITY

Sonden zum Mars konnten zwar bereits chemische Elemente auf der Oberfläche bestimmen. Doch die Identifikation einzelner Mineralien – ihre Zusammensetzung, konkrete Verbindungen und Kristallstrukturen – war erst mit dem Thermal Emission Spectrometer (Tes) möglich: Dieses Instrument hatte ich für den Mars Global Surveyor entwickelt, der 1997 in eine Umlaufbahn um den Planeten einschwenkte.

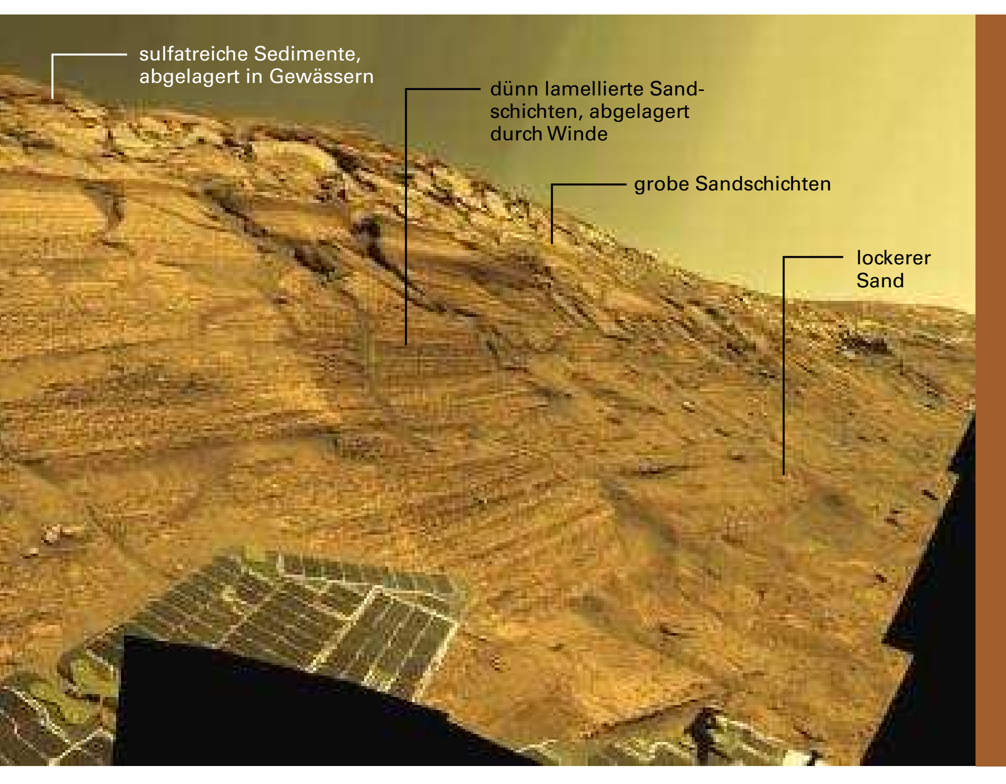
In den Mineralienkarten, die wir damals mit der Sonde erstellten, war uns Meridiani bereits durch seinen großen Anteil von kristallinem Hämatit aufgefallen. Dieses auf der Erde häufige Eisenoxid kann durch verschiedene Prozesse entstehen, von denen die meisten Wasser erfordern. Ein Weg geht über die Ausfällung aus Flüssigkeiten, die durch Sedimente strömen. Bei einem anderen Prozess werden wasserhaltige Eisenmineralien – wie Goethit, ein rötlich braunes, in Wüstenböden häufiges Mineral – abgelagert und dehydriert. Die hämatitreichen Gesteine von Meridiani schienen fein geschichtet zu sein. Sie überlagerten eine ältere, mit Kratern bedeckte Oberfläche, was auf Sedimente hinwies. Außerdem füllten die Gesteine ältere Kanäle und relativ flaches Gelände aus. Offenbar hatten sich diese Gesteine in Wasser abgelagert und waren nicht wie Vulkanasche oder Staub über die Landschaft verweht worden.

Innerhalb des ersten Tages nach der Landung bestätigte Opportunity bereits, dass Meridiani einst unter Wasser gelegen haben muss. Der Rover stand direkt neben geschichteten Sedimentgesteinen, den ersten, die jemals auf dem Mars gesichtet wurden. Diese Gesteine waren mit 30 bis 40 Gewichtsprozenten derart sulfatreich, dass als Erklärung nur das Verdunsten schwefelhaltiger Gewässer in Frage kam. Die Sulfate im Gusevkrater waren lange nicht so reichhaltig. Der Hämatit kam in Gestalt von ein bis fünf Millimeter kleinen Kugeln vor, die Blaubeeren getauft wurden, auch wenn sie eher grau wirkten: Sie lagerten, eben wie Blaubeeren in einem Muffin, in Gesteinsschichten und über den Boden verstreut (siehe Kasten S. 78).

Sechs Monate lang erkundete Opportunity einen Aufschluss, Burns Cliff genannt, und nahm Messungen an jeder von elf Schichten vor. Diese schienen jeweils aus Sanddünen gebildet worden zu sein, befeuchtet durch Wasser von der Oberfläche oder aus dem Boden. Viele der Körnchen in ihnen waren Sulfate, wie sie sich bei der Verdunstung von stehenden Gewässern bilden, vielleicht zwischen den Dünen in flachen Zonen, so genannten Playas. Vergleicht man sie mit analo-

IN KÜRZE

- **Die Rover Spirit und Opportunity** erkunden seit über eineinhalb Jahren die Oberfläche des Roten Planeten. Zugleich haben drei Satelliten inzwischen den Mars in Topografie und Mineralogie mit einer Genauigkeit kartiert, die wir sonst nur von der Erde kennen.
- **Vorher konnte auf Wasser auf dem Mars** lediglich morphologisch geschlossen werden: etwa aus Bildern von Tälern und Becken, die jedoch noch keine eindeutigen Beweise lieferten. Heute liegen Belege vor in Form von Mineralien (Eisenoxiden und Sulfaten), Oberflächenelementen (Kügelchen und Rippen am Boden einstiger Gewässer), sodass der Landeplatz von Opportunity zweifelsfrei in einem ausgetrockneten See liegt.
- **Der Rote Planet** weist eine äußerst vielfältige geologische Vergangenheit auf. Große Teile seiner Oberfläche haben wohl kaum jemals einen Tropfen Wasser gesehen; selbst die Landestelle von Opportunity muss die meiste Zeit ausgetrocknet gewesen sein.



Einen spektakulären Sedimentaufschluss bietet Burns Cliff, eine Klippe, die der Rover Opportunity besonders akribisch untersucht hat. Der drei Stockwerke hohe Abhang bildet einen Teil des Rands vom Krater Endurance, etwa 700 Meter von der Landestelle des Rovers entfernt. Ähnlich wie die Gesteine an der Landestelle enthalten die obersten Schichten Sulfatsalze (rot und gelb in der Falschfarbendarstellung im kleinen Bild). Vermutlich entstanden sie, als die Region wiederholt überflutet wurde und austrocknete. Darunter wechseln sich dünne und gröbere Schichten ab – eine Mischung aus im Wasser gebildetem Mineral Hämatit und hydrophoben Basalten (grün). Letztere scheinen aus archaischen Sanddünen entstanden zu sein, die wohl zumeist trocken waren, aber am Rand großer Seen lagen. Der Kraterboden ist mit basaltischem Sand bedeckt (blau im kleinen Bild).

gen Strukturen auf der Erde, dann haben sich die Gesteine des Burns Cliff in tausenden bis hunderttausenden Jahren formiert. Die Hämatitkügelchen dürften erst später entstanden sein, als eisenhaltige Flüssigkeiten durch die Sedimente zirkulierten. Zum ersten Mal überhaupt erforschten Wissenschaftler hier einen Aufschluss auf dem Mars auf dieselbe Weise, wie es Geologen auf der Erde tun.

Selbst die Morphologie der Meridiani-Ebene, eine der flachsten Landschaften des Planeten, erinnert an das trocken gefallene Bett eines Sees. Die Verbreitung des Hämatits, wie sie sich aus dem Orbit darstellte, legte bereits nahe, dass hier einst eher ein isolierter, großer See oder ein kleines Meer lag als der Teil eines großen Ozeans. Mehrere Krater im Süden und Westen der Hauptablagerung des Hämatits besitzen geschichtete, hämatitreiche Gesteine – vielleicht lagen hier ebenfalls vereinzelte Seen. In dieser Gegend muss also Wasser weit verbreitet gewesen sein.

Kurz gesagt schien es, als ob die beiden Rover auf zwei völlig unterschiedlichen Planeten gelandet waren, der eine trockener als jede Wüste auf der Erde, der andere ein Land von tausend Seen. Waren dies schon alle Möglichkeiten, oder kannte die Marsgeologie noch mehr Varianten? Repräsentierten die beiden Gegenden, Tausende von Kilometern voneinander entfernt, schon die gesamte Vielfalt von Gesteinszusammensetzungen und Wasseraktivität auf dem Mars? Um solche Fragen zu klären, mussten wir uns nochmals mit den älteren Aufnahmen aus dem Marsorbit beschäftigen.

Viel Feuchtigkeit im Planetenmantel

In den vergangenen acht Jahren hatten Forscher mit unserem Tes-Instrument zeigen können, dass Gestein und Sand auf dem Mars fast ausschließlich aus den vulkanischen Mineralien Feldspat, Pyroxen und Olivin bestand – den Komponenten von Basalt. Das Nahinfrarot-Spektrometer Omega auf dem europäischen Marsorbiter Mars Express hat seit Anfang 2004 die enorme Verbreitung dieser Mineralien bestätigt. Olivin kann noch in über 4,5 Kilometer Tiefe in den Canyons der Valles Marineris nachgewiesen werden. Es überdeckt die äquatorialen Ebenen, inklusive der Böden von Kanälen. Die Entdeckung von Basalt hat uns nicht sehr überrascht: Dieses Gestein dominiert auch große Teile der Erde und des Monds. Es ist eine ursprüngliche Art von Lava, die beim ersten Aufschmelzen des Erdmantels entsteht, an den mittelozeanischen Rücken austritt und dort ständig neuen Meeresboden produziert. Die Lava, die auf Hawaii austritt, bildet ebenfalls Basalt.

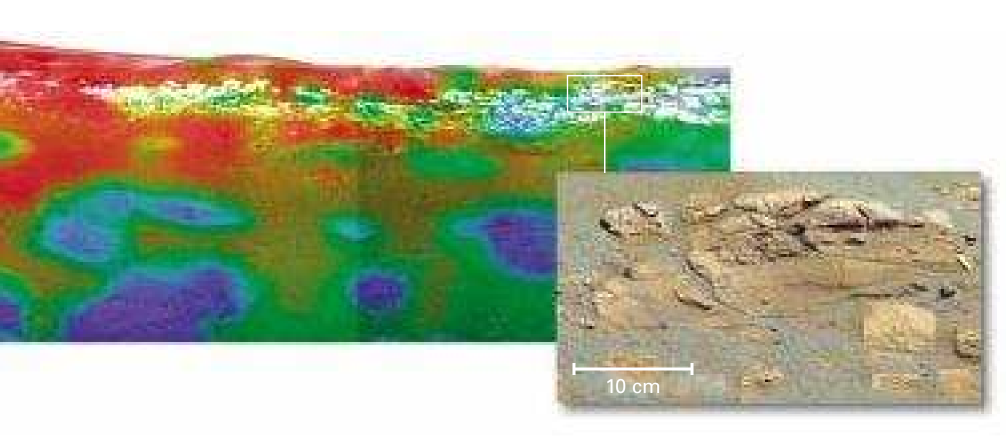
Eine andere Entdeckung überraschte uns jedoch. Während die Marsgesteine in alten, dicht mit Kratern überdeckten Gebieten Basalte enthielten, entsprachen die jüngeren Gesteine der nördlichen Tiefländer einem weiter entwickelten Lavatyp, der Andesit genannt wird: Diese Felsen enthielten mehr Glas, mehr kieselsäurereiche und weniger eisenhaltige Mineralien. Auf der Erde entstehen Andesite typischerweise, wenn sich abtauchende tektonische Platten mit Wasser vermischen und unterirdisches, geschmolzenes Gestein bilden. Die mögliche Existenz von Andesiten auf dem Mars hat uns gleich fasziniert. Sie könnte andeuten, dass der Mantel des Planeten insgesamt feuchter ist als derjenige der Erde oder dass jüngere Lava bei unterschiedlichen Temperaturen oder Drücken geschmolzen ist als die älteren Basalte. Manche Wissenschaftler glauben allerdings, auch die mutmaßlichen Andesite stellen in Wirklichkeit nichts anderes als Basalt dar, der sich lediglich durch Einwirkung von Wasser oder Säure mit einer andesitischen Schicht überzogen hat. Erst weitere Untersuchungen des Gesteins dürften diese strittige Frage klären.

Das Tes-Instrument auf dem älteren Nasa-Satelliten Mars Global Surveyor konnte den Boden nur grob kartieren: Ein Bildpunkt erfasste fünf Kilometer im Durchmesser. Die wahre Vielfalt der ▷

▷ Marsmineralogie enthüllte sich daher erst ab 2001, als das Instrument Themis auf dem neueren Nasa-Orbiter Mars Odyssey den Planeten mit 100 Meter Auflösung zu kartieren begann. Meine Gruppe hatte diese Infrarotkamera entwickelt. Themis und Omega konnten eine große Vielfalt von Eruptivgestein entdecken, wie wir sie sonst nur von der Erde kennen.

Nahe dem Marsäquator sitzt der 1100 Kilometer große Vulkan Syrtis Major. Eine Reihe eingestürzter Krater oder Calderen krönt seinen Gipfel. Der Großteil des Vulkans ist basaltisch, aber die Hänge sind mit Kegeln und Lavaströmen übersät, die aus glasartigen, kieselsäurereichen Laven namens Dazit bestehen. Dieser Gesteinstyp stammt aus Magmakammern, wie sie unter Vulkanen liegen. Sobald sich Magma abkühlt, kristallisieren zuerst die eisen- und magnesiumhaltigen Mineralien Olivin und Pyroxen. Sie sinken auf den Boden der

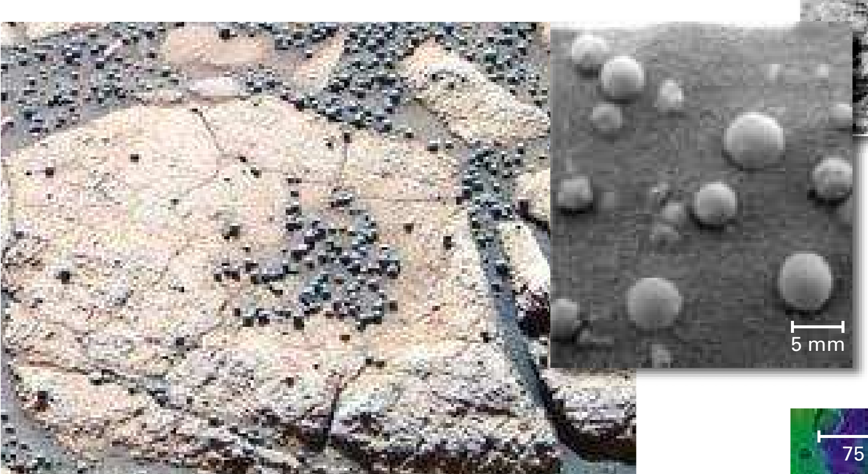
Wo einst Seen und Meere den Mars bedeckten



◀ Die Landestelle von Opportunity im Krater Eagle enthält unterschiedliche Mengen des Minerals Hämatit, von gering (blau) bis hoch (rot). Der Rover landete zuerst außerhalb des Kraters und hüpfte dann, eingehüllt in seine Airbags, bis ins Innere des Beckens; die blauen, runden Flecken zeigen Stellen, wo der Rover dabei mehrfach abprallte, bevor er zur Ruhe kam. Die weißen Gebiete sind Aufschlüsse von Gestein, das sich als im Wasser abgelagerte Sulfate und Hämatite entpuppte.

KRATER EAGLE (2): NASA / JPL / CORNELL UNIVERSITY / ARIZONA STATE UNIVERSITY

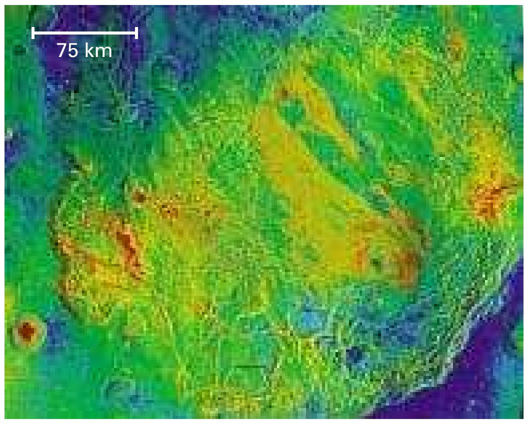
▼ »Berry Bowl« (Beerenschüssel) ist eine sanfte Vertiefung voll so genannter Blueberries (Blaubeeren). Das sind graue, nur durch Falschfarben blau geratene, schrotkorngroße Kügelchen, die über die ganze Landestelle Opportunitys verstreut liegen. Wie die Roveranalysen ergaben, handelt es sich dabei um Hämatit, das vermutlich unter Wasser in den Poren des Seebodens ausfiel.



1 cm

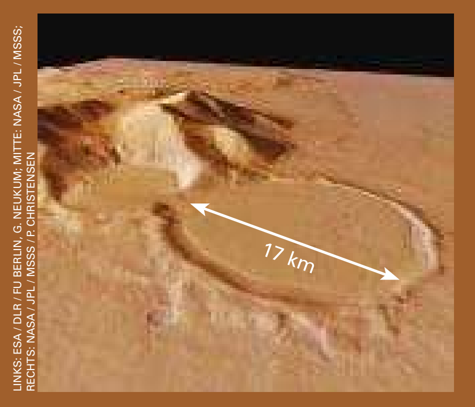
◀ Eine Mikroskopaufnahme Opportunitys zeigt Beeren, die noch in den Felsen Upper Dells an der Landestelle eingebettet sind (links). Die Krümmung der Schichten könnte durch Rippen im Sand unter fließendem Wasser entstanden sein (oben).

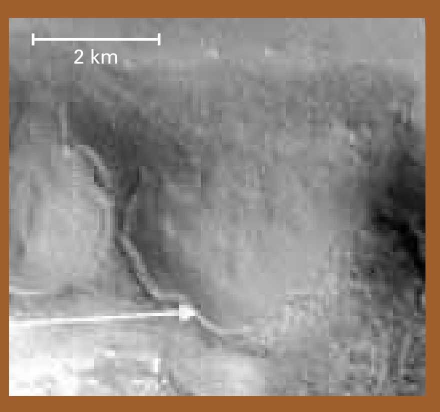
MIKROSKOPAUFNAHMEN DER BEEREN: NASA / JPL / CORNELL UNIVERSITY



▶ Aram Chaos ist der Name eines Einschlagkraters, der große Mengen Hämatit enthält. Temperaturmessungen bei Nacht vom Orbiter Mars Odyssey lieferten Hinweise auf den Bodentyp: Warm (rot) bedeutet Gestein, kalt (blau) Staub oder Sand. Die flachen Felsen in der Kratermitte scheinen Sedimente auf dem Grund eines ehemaligen Sees zu sein. Die großen Blöcke auf der Südseite könnten entstanden sein, als Wasser unter der Oberfläche herausschoss und dadurch der Boden plötzlich einsackte.

ARAM CHAOS: NASA / ARIZONA STATE UNIVERSITY / TIM GLOTH







LINKS: ESA / DLR / FU BERLIN, G. NEUKUM; MITTE: NASA / JPL / MSSS; RECHTS: NASA / JPL / MSSS / P. CHRISTENSEN

Schnee auf dem Mars: Der Planet mag heute zwar nicht mehr so dynamisch sein wie einst, aber in gewisser Weise ist er immer noch aktiv. Zum Beispiel spürte der Esa-Orbiter Mars Express an Berghängen und Kratern geologisch junge Gletscher auf (links). Der Orbiter Mars Odyssey entdeckte Schneeablagerungen auf polseitigen Berghängen (Pfeile). Schnee könnte die Quelle für Wasser gewesen sein, das die frischen Gullies erzeugte (rechts). Sollte es auf dem Mars heute noch irgendwo Mikroben geben, dann wahrscheinlich in diesen Schneefeldern.

Kammer und hinterlassen das restliche Magma angereichert mit Silikaten und Aluminium – daraus entstehen die Dazite. Die Zentralkegel mehrerer Krater auf den Flanken von Syrtis Major bestehen aus einem kieselsäurereichen Gestein, nämlich Granit, und könnten entstanden sein, als sich Kristalle entweder rasch wieder trennten oder ältere Basalte erneut aufschmolzen.

Aus all dem schließen Mineralogen, dass Syrtis Major mehrere Entwicklungsstufen durchlaufen haben muss. Zunächst brach im Zentrum basaltische Lava hervor und ließ den Vulkan wachsen. Als sich das Magma chemisch entwickelte, zog es sich aus der Kammer unter dem Gipfel zurück. Dabei brach der Vulkanboden ein und speiste an seinen Flanken neue Eruptionen. Die Marsvulkane sind nicht nur gewaltig, sie haben auch eine überraschend komplexe Geschichte.

Ebenso wichtig wie das, was der Rote Planet hat, ist das, was ihm fehlt. Auf der Erde kommt Quarz häufig vor, aber auf dem Mars ist er kaum vertreten. So wird vermutet, auch Granit, aus dem er entsteht, ist dort selten. Auch gibt es keine Anzeichen für metamorphe Mineralien wie Schiefer oder Marmor, die sich bilden, wenn vulkanisches oder Sedimentgestein hohen Drücken oder Temperaturen ausgesetzt sind. Daraus lässt sich folgern, dass der Mars wohl nie eine Tektonik besaß, die Gestein in große Tiefen befördern konnte, wo es aufgeheizt und zusammengedrückt wird, und dann wieder an die Oberfläche transportiert.

Die Erde besitzt riesige Vorkommen von Karbonatgestein sowie Kalkstein, das aus warmen, kohlendioxidreichen Ozeanen ausfiel. Auf dem Mars sollte man, wenn er einst wärmer und feuchter war, dicke Karbonatschichten erwarten, doch wurden keine entdeckt. Das bedeutet, dass alle Ozeane entweder kalt, kurzlebig, eisbedeckt oder überhaupt karbonatfeindlich waren. Der allgegenwärtige Marsstaub enthält zwar kleine Mengen Karbonat, aber diese Partikel entstanden wahrscheinlich durch direkte Wechselwirkung mit Wasserdampf in der Atmosphäre anstatt in Oberflächengewässern. Eine andere Mineralienklasse im Zusammenhang mit Wasser, die Tone, findet sich auf dem Mars ebenfalls selten – ein weiterer Hinweis auf einen überwiegend trockenen Planeten. Was wiederum zur weiten Verbreitung der hydrophoben Mineralien Olivin und Pyroxen passt.

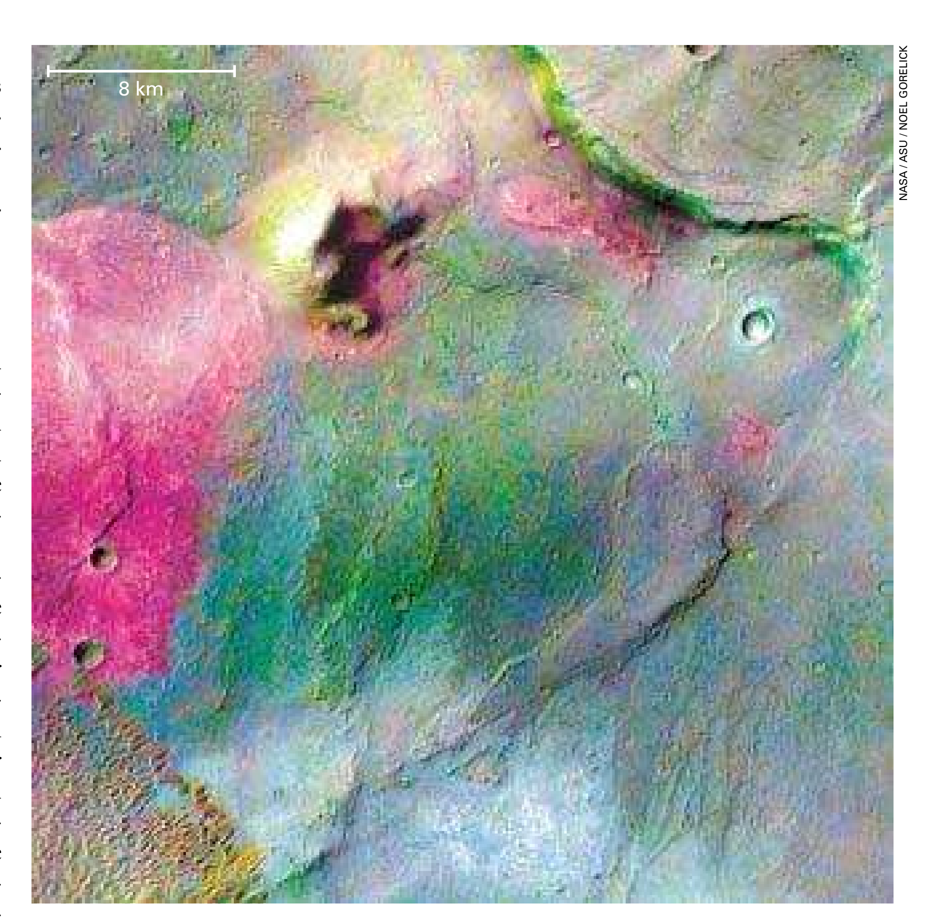
Am Tag, als der Regen kam

In diesem Sinne scheint das, was Spirit im Gusevkrater sah, repräsentativer zu sein als die Funde Opportunitys in der Meridiani-Ebene. Und doch ist Meridiani nicht der einzige Ort, wo auf Satellitenfotos Seen erkennbar sind. Aram Chaos, ein 280 Kilometer breiter Krater, hat einen Ausflusskanal mit geschichtetem, hämatithaltigem Gestein angefüllt. Gigantische Felsblöcke bedecken seinen Boden. Der Krater wirkt, als ob während einer Katastrophe unter der Oberfläche eine regelrechte Wasserflut freigesetzt wurde und diese das darüberliegende Gelände zum Einsturz brachte. Einiges von dem Wasser staute sich in Aram Chaos und formte dabei die Sedimente.

Auf ähnliche Weise enthalten Rinnen in den Valles Marineris hämatithaltiges Gestein in feinen, leicht erodierenden Schichten, ganz wie man es bei Ablagerungen in stehenden Gewässern erwarten würde. Diese und weitere Gesteine quer über die ganze Äquatorregion sind reich an Sulfaten: ein klares Zeichen für im Wasser abgelagerte Sedimente. Die Seen könnten zahlreiche Episoden von Überflutung, Verdunstung (eventuell auch Einfrieren) und Austrocknung durchgemacht haben. Zusätzlich zu den alten Seeböden gibt es auch Regionen, die von einem dichten Netzwerk aus Kanälen durchzogen sind, offenbar entstanden durch häufigen Regen, der dann abfloss. Manche Forscher vertreten auch die These, dass unseren Nachbarplaneten einst ausgedehnte Ozeane bedeckten. Immerhin deuten Bilder und topografische Daten durchaus auf Küstenlinien und glatte Meeresböden hin.

Zusammen lieferten diese Entdeckungen starke Belege dafür, dass Wasser zumindest in isolierten Regionen über kurze Zeit dauerhaft präsent war. Welche Faktoren sorgten dafür, dass sich Wasser dort ansammelte und eine Weile blieb? Die führende Hypothese spricht für eine ▷

Nili Patera, eine Region auf dem Gipfel des gigantischen Vulkans Syrtis Major, enthält sowohl ältere basaltische Lava (blau) wie auch jüngere Dazitkegel und Ausflüsse (rot). Die Sanddünen (orange) bilden ein Gemisch dieser beiden Bodentypen.



Kombination aus Erdwärme, großen Mengen Salz (das die Erstarrungstemperatur senkte) und einer schützenden Schicht aus Eis. Sporadisch könnten auch größere kosmische Einschläge die Atmosphäre dichter und wärmer gemacht haben.

Doch die Idee eines einstmals erdähnlichen Planeten scheint damit passee zu sein. Auf Grund der globalen Marskartierung präsentiert sich uns eine sehr alte Oberfläche, deren ursprüngliche vulkanische Mineralien auch heute noch vorhanden sind, die kaum von Wasser verändert wurden. Selbst in Meridiani überdeckt basaltischer Sand die Seesedimente, ein Indiz dafür, dass diese Stelle seit zwei bis drei Milliarden Jahren ausgetrocknet sein muss. Seen und flussartige Netzwerke existieren zwar, aber Wasser floss durch sie wohl nur für relativ kurze Zeit. Möglicherweise war es die meiste Zeit gefroren, nur gelegentlich flüssig und dann wieder rasch zu Eis erstarrt. Gleichwohl rätseln die Planetologen, wie eine derart wüstenhafte Welt zumindest an bestimmten Orten und zu bestimmten Zeiten so reich an Wasser gewesen sein kann.

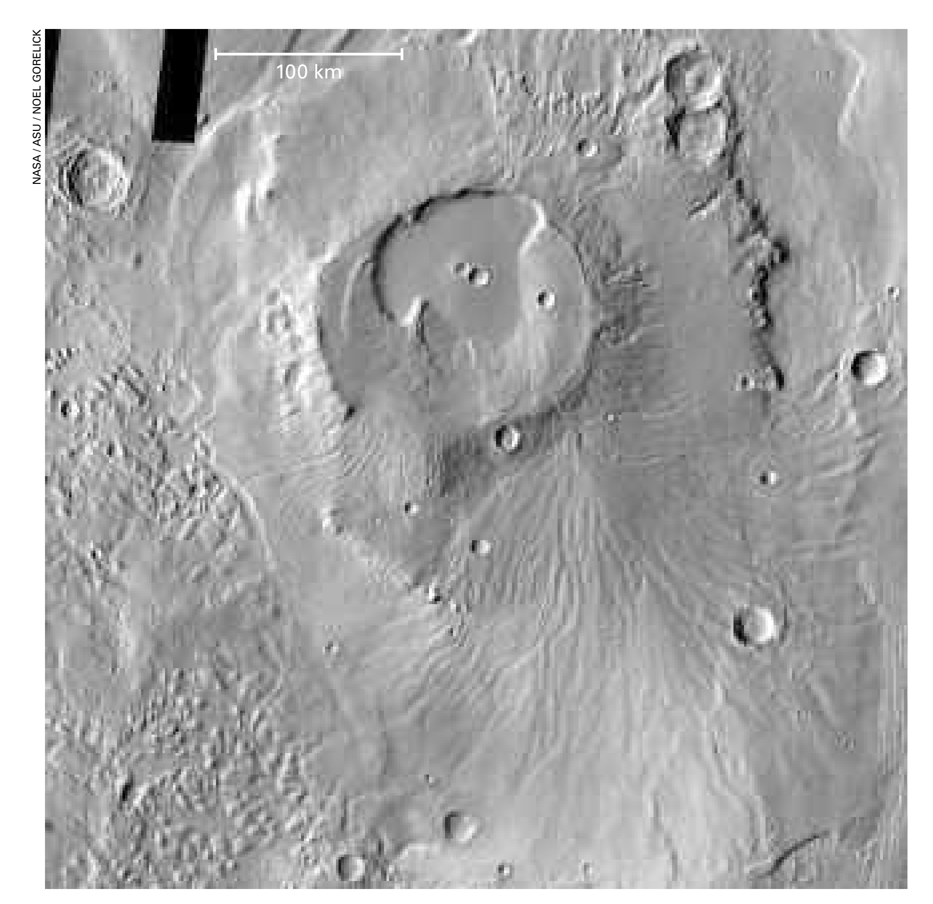
Wasser in rauen Mengen

Die dramatische Vergangenheit des Roten Planeten zieht zwar die meiste Aufmerksamkeit auf sich. Doch haben zuletzt zwei Entwicklungen die Analyse neu belebt. Hinter der einen steht der wachsende Konsens, dass der Mars auch in jüngster Vergangenheit noch geologisch aktiv gewesen sein muss. Die meisten großen Vulkane und Lavaebenen sind zwar alt und stammen aus der Urzeit des Planeten. Aber das Fehlen kosmischer Impaktkrater auf Lavaflüssen in Regionen wie Athabasca spricht für ihr – im geologischen Sinne – junges Alter: Diese Eruptionen liegen offenbar gerade erst ein paar Millionen Jahre zurück. Jedoch wurden aktive Vulkane oder geothermische heiße Flecken, so genannte Hotspots, auf nächtlichen Infrarotaufnahmen bisher vergeblich gesucht. Der Mars scheint sich also heute bis zu einem Punkt abgekühlt zu haben, an dem Vulkanismus nur mehr sehr selten auftritt, obwohl gelegentlich dennoch Lava bis an die Oberfläche vordringt.

Und dann gibt es die Entdeckung, dass der Mars offenbar enorme Reservoire gefrorenen Wassers besitzt, die um den Planeten wandern, während sich das Klima des Planeten verändert. Zunächst einmal sind beide Pole mit Ablagerungen von Eis oder eisreichen Sedimenten bedeckt. Sie sind bis zu mehrere Kilometer dick und fast doppelt so groß wie Deutschland. Infrarotmessungen haben schon in den 1970er Jahren gezeigt, dass die Nordpolkappe aus Wassereis besteht, während die Zusammensetzung der Südpolkappe unklar blieb. Die Oberflächentemperatur würde zu Eis aus Kohlendioxid passen, aber könnte darunter auch Wassereis liegen? Neue Messungen mit dem Themis-Sensor haben es inzwischen an bestimmten Stellen lokalisieren können.

Zu dem bekannten Wasserreservoir addiert sich das Eis unterhalb der Marsoberfläche. Es wurde durch das Gamma Ray Spectrometer und den High Energy Neutron Detector auf dem Mars-Odyssey-Orbiter entdeckt. Diese Instrumente messen Gammastrahlung und Neutronen, die entstehen, wenn Kosmische Strahlung im Marsboden mit Atomen kollidiert. Die Energieverteilung von Gammaquanten und Neutronen verrät die Zusammensetzung der Elemente im Boden bis zu einer Tiefe von mehreren Metern. Wasserstoff zum Beispiel absorbiert Neutronen so stark, dass ein Defizit an gemessenen Neutronen direkt auf Wasserstoff unter der Oberfläche hinweist – wahrscheinlich in Form von H_2 oder H_2O. In Gebieten jeweils zwischen 60 Grad Breite und beiden Polen scheint Wasser sogar mehr als 80 Prozent des Bodens auszumachen. Ein derart hoher Eisanteil lässt sich nicht durch einfache Diffusion von Wasserdampf aus der Atmosphäre in die Poren des Marsbodens erklären. Stattdessen muss sich das Eis direkt als Schnee oder Raureif abgelagert haben.

Auch deuten in den mittleren Breiten ungewöhnliche Landschaftsformen auf Eisvorkommen hin. Auf beiden Hemisphären sehen wir zwischen 30 und 50 Grad Breite Gelände mit der Textur eines Basketballs: Solche Strukturen könnten entstehen, wenn sich die Oberfläche erwärmt, das Eis verdampft und



NASA / ASU / NOEL GORELICK

Apollinaris Patera ist über hundert Kilometer groß, aber vergleichsweise niedrig. Dieser Vulkan könnte die Asche ausgestoßen haben, die der Rover Spirit 350 Kilometer weiter südlich entdeckt hat. Die vulkanischen Ablagerungen wurden von Wasser tief eingeschnitten.

dabei der Boden zerkrümelt. Eine zweite Art von Ablagerungen, die man in Hohlräumen an kalten Hängen in Richtung der Pole findet, ist eine rund zehn Meter dicke Schicht aus einem Material, bei dem es sich um Überreste nahezu reinen Schnees aus Wasser handeln könnte. Besonders beeindruckt waren wir, als zuletzt in mittleren Marsbreiten kleine, frische Abflussrinnen entdeckt wurden, so genannte Gullies. Vielleicht wurden sie von Quellwasser ausgespült, als kurzzeitig oberflächennahes Eis oder Schneedecken schmolzen.

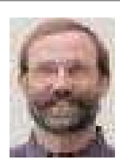
Eiszeiten auf dem Nachbarplaneten?

All diese Strukturen, die mit Wasser zusammenhängen, legen es nahe, dass der Mars – wie die Erde – heute durch einen Zyklus von Eiszeiten läuft. Die Neigung der Rotationsachse des Nachbarplaneten gegenüber der Senkrechten auf der Bahnebene schwankt in 125 000 Jahren um bis zu 20 Grad. Ist die Neigung gering, werden die Pole zu den kältesten Orten des Planeten. Dann fällt mehr Schnee als verdampft, was in der Summe die Eisschicht wachsen lässt. Ist die Achse stärker geneigt, werden die Pole von der Sonne stärker beschienen und erwärmen sich auf Kosten der mittleren Breiten. Wasser bewegt sich im Mittel von den Polen in Richtung Äquator. Während sich an der Oberfläche Schnee anhäuft, kann darunter Schmelzwasser im Boden versickern. Derzeit erwärmen sich die mittleren Breiten auf dem Mars, und die Schneebedeckung ist dort auch weit gehend verschwunden. Wenn die Hypothese von den Eiszeiten zutrifft, werden diese in 25 000 bis 50 000 Jahren zurückkehren.

Die Geschichte der Marsforschung erinnert an das Gleichnis von Blinden, die einen Elefanten beschreiben: Die Geologie des Roten Planeten verändert sich, je nachdem wohin man schaut. Er ist ein reich gestalteter Ort mit einer unerhört dynamischen Gegenwart und einer verblüffenden, ja paradox erscheinenden Vergangenheit. Sein vulkanisches Gestein ist so vielgestaltig wie das der Erde, und die Art, wie sich Wasser dort manifestiert, variiert enorm. Der Planet hat früher in seiner Geschichte starke Fluten erlebt, vielleicht sogar Regen. Jedoch enthalten seine alten Steine Mineralien, die in einer feuchten Umwelt rasch zerfallen würden. Das Marsklima ist trocken und kalt, aber der Rover Opportunity fand sich auf dem Boden eines alten Sees wieder, der einer Zeit entstammt, als dort offenbar ein ganz anderes Klima herrschte. Flüssiges Wasser ist heute auf dem Roten Planeten nicht stabil, aber dennoch sind vor Kurzem die Gullies entstanden, ein Prozess, der vielleicht noch andauert.

Die Vielfalt seiner Umweltbedingungen, variabel im Wandel der Zeiten und von Ort zu Ort, lässt sogar auf eine mögliche Marsbiologie hoffen: Eine Reihe diverser Orte steht zur Auswahl, in denen Leben Fuß gefasst haben könnte. Wasser war in den Seen sicher längere Zeit, wenn auch mit Unterbrechungen, vorhanden. Vielleicht lange genug, um aus toter Materie lebendige entstehen zu lassen. In Winterstarre während Kälteperioden und auftauend, wenn sich das Klima verbesserte, könnten Organismen bis heute überlebt haben. Die übrig gebliebenen Schneefelder, die Gullies und andere Gebiete sollten für künftige Marsrover ein idealer Ort sein, um nach Leben auf dem Mars zu suchen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Philip R. Christensen entwickelte sein Interesse für Geologie schon als Kind, auf Reisen durch den amerikanischen Westen. Zum ersten Mal erblickte er den Mars durch ein Teleskop, das ihm seine Eltern als Zwölfjährigem geschenkt hatten. Heute ist er Professor an der Arizona State University in Tempe und weltweit führender Experte für die Zusammensetzung der Marsoberfläche. Christensens Gruppe entwickelte die Infrarotinstrumente für Mars Global Surveyor, Mars Odyssey und die beiden Mars-Rover Spirit und Opportunity.

Martian vistas. Results from the Mars Exploration Rover mission. In Nature, Bd. 436, S. 41, 7. Juli 2005

Roving Mars: Spirit, Opportunity, and the Exploration of the Red Planet. Von Steve Squyres, Hyperion 2005

Opportunity at Meridiani Planum. Sonderheft von Science, Bd. 306, Nr. 5702, S. 1697, 3. Dezember 2004

Spirit at Gusev Crater. Sonderheft von Science, Bd. 305, Nr. 5685, S. 793, 6. August 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Eine bedrohte Art im Magen

Seit Urzeiten lebt im Magen von Menschen das Bakterium *Helicobacter pylori*. In entwickelten Ländern wird es nun selten. Gesundheitlich bringt das Vor-, aber auch Nachteile.

Von Martin J. Blaser

Eigentlich könnte *Helicobacter pylori* seit über hundert Jahren bekannt sein. Schon im Jahr 1875 entdeckten deutsche Anatomen spiralige Bakterien in dem dicken, zähen Schleim, der das Mageninnere auskleidet und den Magen vor Selbstverdauung schützt. Weil sie die Mikroben nicht im Labor züchten konnten, geriet ihre Arbeit jedoch in Vergessenheit.

Erst 1982 gelang es schließlich den australischen Ärzten Barry J. Marshall und J. Robin Warren, den beweglichen Erreger zu isolieren. Nun endlich ließ sich die Rolle eines der ältesten und engsten Begleiter des Menschen im Magen genauer erforschen. Mediziner erkannten bald, dass Personen, die damit infiziert sind, ein erhöhtes Risiko für Magen- und Zwölffingerdarmgeschwüre tragen. Sie wiesen auch nach, dass Helicobacter pylori die häufigste Form des Magenkrebses einleiten kann (siehe meinen Artikel in SdW 4/1996, S. 68).

Zur gleichen Zeit beobachteten Forscher, dass dieses Magenbakterium in Europa und Nordamerika immer seltener vorkommt. In den entwickelten Nationen ist die erwachsene Bevölkerung inzwischen nur noch zu etwa einem Drittel betroffen. In den weniger entwickelten Ländern dagegen beherbergen noch fast alle Erwachsenen das Bakterium, das der Mensch wohl meist früh durch enge Kontakte aufnimmt. Nach Ansicht von Epidemiologen verdanken die Industriestaaten den Rückgang in den vergangenen hundert Jahren zum einen der besseren Hygiene, zum anderen dem häufigen Einsatz von Antibiotika. Zeitgleich hiermit sank die Rate von Magen- und Zwölffingerdarmgeschwüren und von Magenkrebs. Allerdings nahmen Erkrankungen der Speiseröhre parallel dazu dramatisch zu. Unter anderem gilt das für die so genannte Refluxkrankheit, zu deren Symptomen das Sodbrennen zählt, sowie eine besonders fatale Form von Speiseröhrenkrebs.

Ökologische Netze im Magen

Sollte sich der Verdacht eines Zusammenhangs erhärten, hätte das für die derzeitigen Behandlungskonzepte weit reichende Folgen. Beispielsweise müsste die Medizin überdenken, ob es grundsätzlich richtig ist, das Bakterium mit Antibiotika zu bekämpfen – weil es nun einmal nicht in den Magen gehöre. Vordringlich gilt abzusichern, dass der Nutzen einer solchen Therapie größer bleibt als daraus entstehende Risiken. Dazu müssen wir das komplexe Netzwerk an Wechselwirkungen – für uns nützliche wie schädliche – zwischen Helicobacter pylori und seinen Wirten erforschen. Diese Studien könnten letztendlich auch die Bedeutung anderer Bakterien verstehen helfen, die den Menschen besiedeln. Außerdem versprechen die Forschungen Einsicht in die Wege der Evolution, wenn sich solche engen Beziehungen zwischen völlig verschiedenen Organismen ausbilden.

Äußerlich sieht Helicobacter pylori zwar stets gleich aus, doch es gibt von dem Erreger etliche völlig verschiedene Stämme, die genetisch teils stark voneinander abweichen. Forscher entdeckten bald, dass einzelne Menschen ganz verschiedene Versionen beherbergen, oft eine Anzahl von Stämmen gleichzeitig. Das Bakterium besitzt ein einziges Chromosom mit annähernd 1,7 Millionen Nukleotiden, den genetischen Buchstaben. Die komplette Entschlüsselung der Erbsequenzen von zwei getrennten Stämmen ergab jeweils ungefähr 1550 Gene. (Das Darmbakterium *Escherichia coli* besitzt rund fünf Millionen Nukleotide, der Mensch drei Milliarden.) Bemerkenswert erscheint, dass etwa sechs Prozent ihrer Gene nicht übereinstimmen. Sogar die den beiden Stämmen gemeinsamen Gene variieren in ihren Erbsequenzen teilweise beträchtlich.

Eine derart hohe Vielfalt bei derselben Art ist selbst unter Mikroben selten. Nimmt man zum Beispiel den Menschen, so gleicht er genetisch sogar dem Schimpansen mehr, der doch immerhin eine andere Art darstellt: Die Nukleotidsequenzen beider Primaten stimmen zu rund 99 Prozent überein. Bewohnt H. pylori den Menschen seit Urzeiten und bildete darum so viele Linien? Oder war keine Variante stark genug, um die anderen zu verdrängen? Ich werde zeigen, dass beides zutrifft. ▷

▶ **Zwischen Mensch und *Helicobacter pylori* ist eine enge Beziehung entstanden. Im Magen (rot) und im Zwölffingerdarm löst der Erreger Entzündungen aus. Die Speiseröhre (grün) hingegen scheint von dem Bakterium zu profitieren.**



JOSEPH DANIEL FIEDLER

Meine Arbeitsgruppe konnte bei dem Magenbakterium zwei spezielle Fälle von Variation identifizieren. Im Jahr 1989 erstellten wir mit Hilfe von E.-coli-Bakterien eine so genannte Bibliothek von H.-pylori-Genen. Dazu bringt man selektiv Fragmente des zu untersuchenden Erbguts in das Darmbakterium ein, damit es die fremden Gene abliest und die zugehörigen Proteine bildet. Um in den einzelnen Proben jeweils die neuen Proteine – und somit dann die zugehörigen Gene – zu finden, benutzten wir Blutserum eines Helicobacter-Wirts, und zwar meines. Weil ich infiziert war, sollte mein Blut Antikörper gegen einige der betreffenden Proteine aufweisen.

Die erste E-coli-Probe, auf die meine Antikörper ansprachen, enthielt ein Gen, das wir inzwischen *cagA* nennen. Es kodiert das Protein CagA. Dies war bei H. pylori der erste Fall für ein Gen, das nur einige der Bakterienstämme besitzen. Wie nachfolgende Forschungen ergaben, besteht bei einer Infektion mit einem Stamm, der dieses Gen trägt, ein höheres Risiko für Geschwüre und Magenkrebs. Andere Stämme sind offenbar nicht so gefährlich.

Inzwischen kennen wir auch den Grund. In der gleichen Region auf dem Bakterienchromosom wie das *cagA*-Gen befinden sich andere Gene, aus deren Proteinen die Bakterien regelrechte Miniatur-Injektionsnadeln bilden. Dadurch injizieren sie das CagA-Protein in Wirtszellen, also in Zellen der Magenwand (siehe Kasten rechts). Diesen Mechanismus bei Helicobacter pylori – den ähnlich oder in abgewandelter Form auch viele andere Bakterien für Toxine verwenden – klärten Forschergruppen in Deutschland, Japan, Italien und den USA im Jahr 2000 auf.

In den Wirtszellen wandeln wirtseigene Enzyme das CagA-Protein um, sodass verschiedene menschliche Proteine Kontakt mit ihm aufnehmen können. Hierdurch wiederum verändern sich schließlich Form und Sekretion der Zellen sowie ihre Signalgebung an andere Zellen. Mit dem *cagA*-Gen ausgestattete H.-pylori-Stämme sind für unseren Magen gefährlicher als andere. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass solche Stämme in der Magenschleimhaut heftigere Entzündungen und Schäden verursachen.

Gefährliche Kombination: Gifte plus riskante Anlagen

Den zweiten Fall für einen genetischen Unterschied fanden wir, als sich mein damaliger Mitarbeiter Timothy Cover einige H.-pylori-Stämme vornahm, die in der Zellkultur bewirkten, dass in Magenepithelzellen regelrechte große Löcher entstanden. Verantwortlich dafür war, wie wir zeigten, wiederum ein bakterielles Toxin. Wir nannten dieses giftige Protein VacA und das betreffende Gen *vacA*. Diese Substanz verursacht nicht nur solche Löcher, sondern dämpft auch die menschliche Immunreaktion auf das Bakterium: Sie setzt im Magengewebe die weißen Blutkörperchen außer Gefecht, die eigentlich den Erreger bekämpfen müssen (siehe Kasten rechts). Nun enthalten zwar alle H.-pylori-Stämme ein *vacA*-Gen. Jedoch produzieren nur manche von ihnen das voll funktionsfähige toxische Protein – was daran liegt, dass die Erbsequenz dieses Gens beträchtlich variiert.

Ein anderer Laborgast, John C. Atherton, entdeckte zu dem Gen vier Hauptvarianten: bei m1 und m2 sind mittlere Bereiche des Gens verschieden; bei s1 und s2 ist die Region anders, welche den Signalabschnitt des Proteins kodiert, der die Passage durch die Zellmembran ermöglicht. Weitere Untersuchungen zeigten, dass die s1-Variante in mindestens drei Untertypen vorkommt, genannt s1a, s1b und s1c.

Das schädlichste VacA-Protein entsteht, wenn in einem H.-pylori-Stamm m1 und s1 zusammen auftreten. Da verwundert es nicht, dass die Magenkrebsgefahr am höchsten ist, sofern Stämme mit einem m1/s1-Genotyp zusätzlich auch noch das *cagA*-Gen aufweisen. Allerdings hängt das individuelle Risiko auch von eigenen genetischen Anlagen ab. Manche Menschen besitzen Genvarianten, welche von Helicobacter hervorgerufene Entzündungen noch verstärken. Das bedeutet: Die ungünstigste Konstellation besteht, wenn eine Person mit diesen Genvarianten von besonders aggressiven H.-pylori-Stämmen besiedelt ist. Tatsächlich scheint ein Magenkrebs meistens auf das unglückliche Zusammentreffen hoher eigener Anfälligkeit und derart ausgestatteter Erreger zurückzugehen.

Sobald die Wissenschaftler wussten, wie sie einzelne H.-pylori-Stämme unterscheiden konnten, begannen Untersuchungen über die weltweite Verteilung von Varianten. Damals hatten Forscher die Bakterien bereits in verschiedenen Regionen gesammelt. Die Zusammenarbeit mit Leen-Jan van Doorn aus Delft erbrachte, dass sich die einzelnen *vacA*-Varianten – wie auch deren Untertypen – nicht gleichmäßig verteilen. So häufen sich beispielsweise in Ostasien bei der s1-Variante Stämme des Typs s1c; in Mittel- und Nordeuropa herrschen s1a-Stämme vor, im westlichen Mittelmeerraum s1b-Stämme (siehe Kasten S. 86).

Solche Befunde versprachen Aufschluss über die Verbreitungswege und möglicherweise das Alter des Bakteriums. Mein Kollege Guillermo I. Perez-Perez und ich interessierten uns speziell für dessen Herkunft und Ankunftszeit in Amerika. Darum untersuchten wir verfügbares Material aus Lateinamerika. In diesen Proben trat der auf der Iberischen Halbinsel vorherrschende s1b-Subtyp weitaus am häufigsten auf. War der Erreger etwa erst mit den spanischen und portugiesischen Siedlern oder den afrikanischen Sklaven nach Amerika eingeschleppt worden? War Helicobacter pylori vielleicht viel jünger als vermutet?

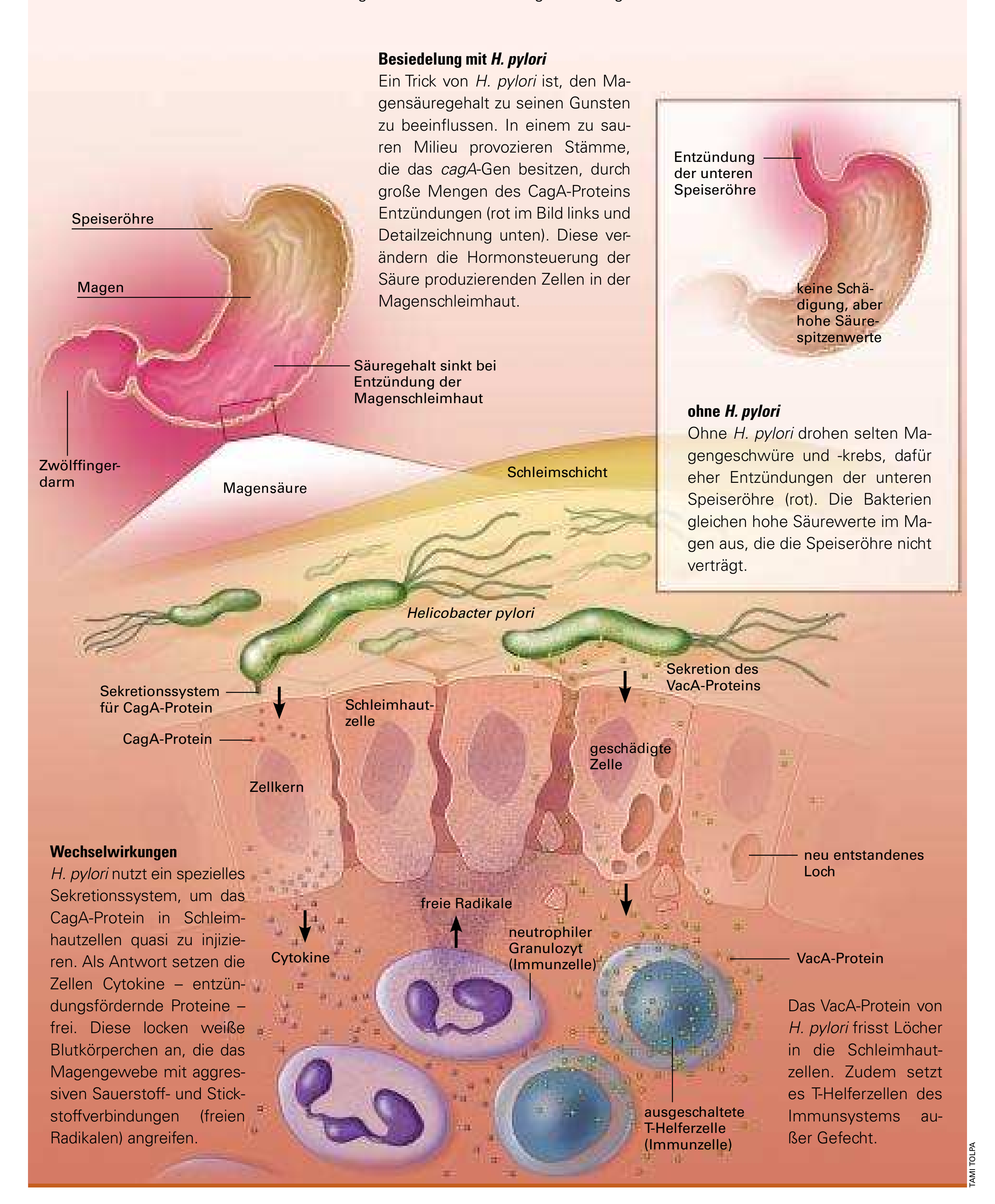
Allerdings stammten diese Proben aus Küstenstädten mit einer europäisch-afrikanisch-indianischen Mischbevölkerung. Die Zusammenarbeit mit Maria Gloria Dominguez Bello vom Institut für Wissenschaftliche Forschung in Caracas ▷

IN KÜRZE

- Das Magenbakterium *Helicobacter pylori* erweist sich als ein **alter Begleiter des Menschen**. Verbesserte Hygiene und Antibiotika haben sein Auftreten in den Industrieländern stark verringert.
- Infizierte Personen tragen ein erhöhtes Risiko für **Magengeschwüre und Magenkrebs**, ein verringertes allerdings für manche Erkrankungen der Speiseröhre. Magenkrebs geht bei uns heute zurück, **Speiseröhrenkarzinome nehmen zu**.
- Die Aufklärung der Wechselwirkungen zwischen *H. pylori* und Mensch könnte zu **neuen Behandlungsmethoden** unter anderem von Magenkrankheiten verhelfen. Zugleich dürfte dies unser Wissen von anderen Bakterien verbessern, die den menschlichen Körper besiedeln.

Schaden und Nutzen eines Magenbewohners

Oft behauptet sich *Helicobacter pylori* über Jahrzehnte im Magen. Trotz Immunabwehr des Wirts richtet der Erreger fortlaufend Schaden an. Vermutlich tauschen Erreger und Wirt in einer so genannten negativen Rückkopplungsschleife Signale aus, die den Gewebsschaden mäßigen sowie den Bakterien ein gleichförmigeres Milieu erhalten.



Besiedelung mit *H. pylori*

Ein Trick von *H. pylori* ist, den Magensäuregehalt zu seinen Gunsten zu beeinflussen. In einem zu sauren Milieu provozieren Stämme, die das *cagA*-Gen besitzen, durch große Mengen des CagA-Proteins Entzündungen (rot im Bild links und Detailzeichnung unten). Diese verändern die Hormonsteuerung der Säure produzierenden Zellen in der Magenschleimhaut.

ohne *H. pylori*

Ohne *H. pylori* drohen selten Magengeschwüre und -krebs, dafür eher Entzündungen der unteren Speiseröhre (rot). Die Bakterien gleichen hohe Säurewerte im Magen aus, die die Speiseröhre nicht verträgt.

Wechselwirkungen

H. pylori nutzt ein spezielles Sekretionssystem, um das CagA-Protein in Schleimhautzellen quasi zu injizieren. Als Antwort setzen die Zellen Cytokine – entzündungsfördernde Proteine – frei. Diese locken weiße Blutkörperchen an, die das Magengewebe mit aggressiven Sauerstoff- und Stickstoffverbindungen (freien Radikalen) angreifen.

Das VacA-Protein von *H. pylori* frisst Löcher in die Schleimhautzellen. Zudem setzt es T-Helferzellen des Immunsystems außer Gefecht.

(Venezuela) ermöglichte es, Proben der indigenen Bevölkerung des venezuelanischen Marktstädtchens Puerto Ayacucho am Orinoko zu gewinnen. Und tatsächlich: In dieser Gruppe trugen die meisten Bakterienstämme den Subtyp s1c, die vorherrschende Form Ostasiens. Folglich hatten vermutlich schon die Vorfahren der heutigen Indianer Helicobacter pylori über die Beringstraße mitgebracht. Mindestens seit 11 000 Jahren dürfte der Erreger demnach im Menschen leben.

Eine jüngere, große Analyse von genetischen Abschnitten einiger hundert H.-pylori-Stämme aus verschiedenen Regionen der Welt lässt annehmen, dass die heutigen Stämme auf fünf alte Populationen zurückgehen. Zwei dürften in Afrika aufgekommen sein, zwei in West- beziehungsweise Zentraleurasien und einer in Ostasien. An diesen Studien waren maßgeblich Forscher um Mark Achtman und Daniel Falush vom Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie in Berlin und um Sebastian Suerbaum, damals Universität Würzburg (jetzt Medizinische Hochschule Hannover), beteiligt.

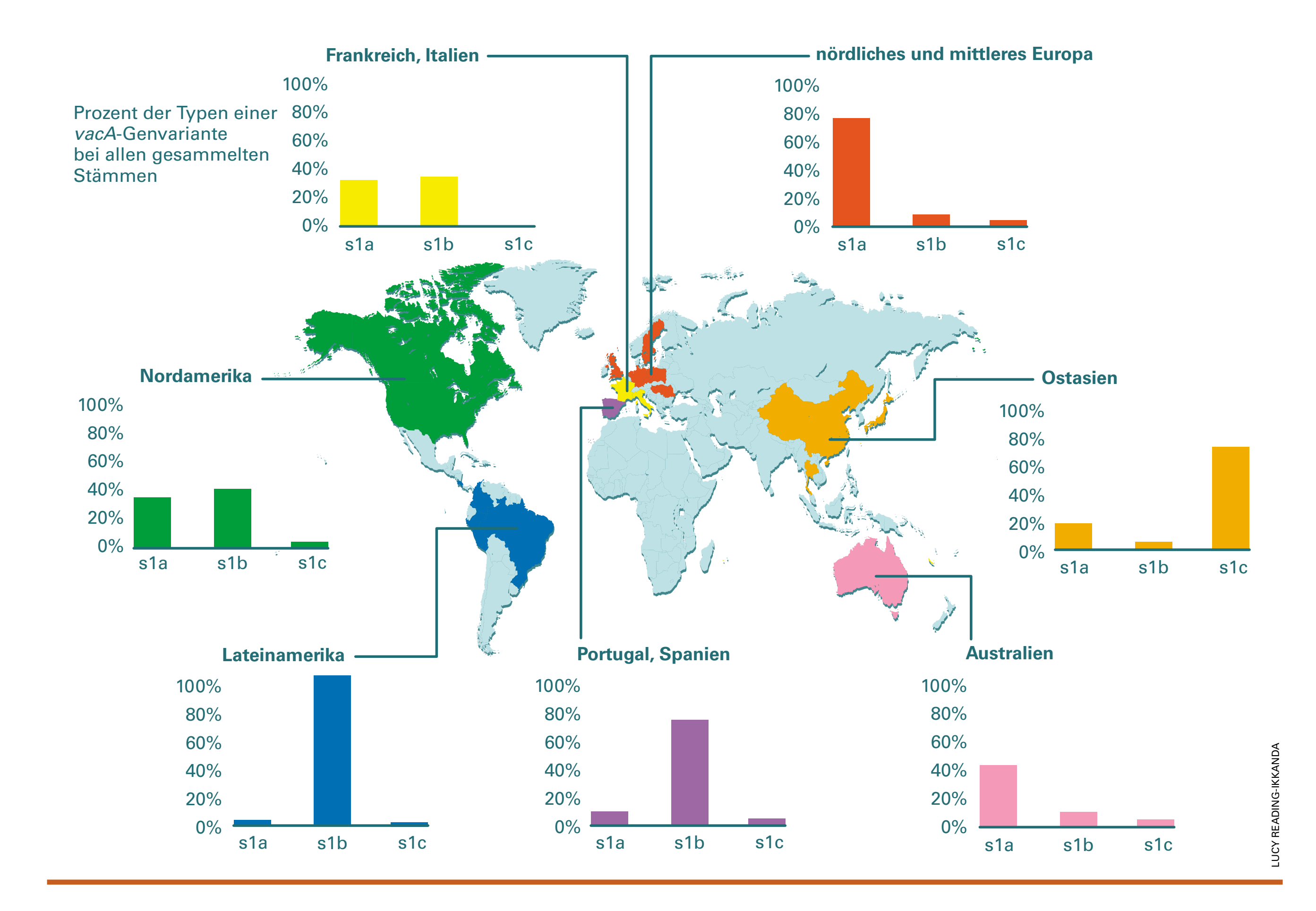
Indiz für Wanderwege des Menschen

Offenbar spiegeln die genetischen Varianten von H. pylori die Siedlungs- und Verbreitungsgeschichte menschlicher Bevölkerungen in den letzten 60 000 Jahren recht gut. Das Genom des Magenbakteriums könnte im Einzelfall sogar genaueren Aufschluss über diese Phase der Menschheitsgeschichte liefern als das gewöhnlich dazu herangezogene Mitochondriengenom des Menschen – schon wegen der deutlich größeren genetischen Variabilität. Bildlich gesprochen gibt die Mitochondrienuhr für die menschlichen Entwicklungslinien eher den Stundenzeiger, Helicobacter den Minutenzeiger.

Der Mensch ist der einzige Wirt von Helicobacter pylori. Wir infizieren uns wahrscheinlich von Mund zu Mund oder auch durch Verunreinigungen etwa mit Fäkalien – meist wohl schon als Kind durch die Mutter, anscheinend kaum als Erwachsene. Das abnehmende Vorkommen in den Industriestaaten im Verlauf der letzten hundert Jahre mag zum Teil durchaus auf die immer besseren sanitären Verhältnisse in diesen Ländern zurückgehen. Ich halte allerdings auch den dort verbreiteten Antibiotikaeinsatz für wesentlich. Schon kurze Therapien mit den Bakterienkillern, gegen welchen Erreger auch immer eingesetzt, können unter Umständen den Magenbewohner mit eliminieren. In den Entwicklungsländern, wo die Menschen viel seltener Antibiotika erhalten, sind Kinder schon mit zehn Jahren zu 70 bis 100 Prozent mit H. pylori infiziert. Meist be-

Regionale Unterschiede

Die Verbreitung der Stämme von *Helicobacter pylori* spiegelt menschliche Bevölkerungsbewegungen. Gezeigt ist hier die Verteilung verschiedener Typen der s1-Variante des Gens *vacA*. In Nord- und Mitteleuropa sowie in Australien herrscht s1a vor, in der Mischbevölkerung Lateinamerikas s1b – wie auch auf der Iberischen Halbinsel –, in Ostasien s1c.



halten diese Personen den Erreger dann lebenslang. Dagegen haben beispielsweise in den USA weniger als 10 Prozent der dort geborenen Zehnjährigen das Bakterium, ähnlich in Deutschland. Daran sieht man, wie stark sich die Mikroökologie des Menschen in letzter Zeit wandelt.

Vielleicht ist der Rückgang von H. pylori zugleich ein Anzeiger oder Vorbote für das Aussterben anderer mikrobieller Begleiter des Menschen. Da Helicobacter als einziges Bakterium das saure Magenmilieu verträgt, lässt sich sein Vorkommen relativ gut durch Untersuchungen von Magengewebe, Atemluft, Blut oder Stuhl nachweisen. Dagegen sind andere Körperregionen – wie Mund, Dickdarm, Haut oder Scheide – von komplexen regelrechten Bakteriengemeinschaften besiedelt. Wenn dort eines der Mitglieder selten würde oder verschwände, würden wir das mit den vorhandenen diagnostischen Verfahren oft wohl nicht einmal bemerken.

Was bedeutet nun der Schwund von Helicobacter pylori für die menschliche Gesundheit? Wie gesagt, treten in den Industrieländern Magengeschwüre und auch Magenkrebs immer seltener auf. (Anders ist das mit durch bestimmte entzündungshemmende Medikamente hervorgerufenen Symptomen.) Diese Erkrankungen, insbesondere Magenkrebs, entwickeln sich über lange Zeiträume hinweg. Darum hinkt ihr Rückgang in der Bevölkerung um Jahrzehnte hinter dem des Bakteriums her – was dieses Ereignis nicht weniger eindrucksvoll macht.

Refluxkrankheit als Ursache für Speiseröhrenkrebs

Um 1900 forderten in den USA Magenkarzinome die meisten Krebstoten. Hundert Jahre später sind deren Auftreten sowie die Magenkrebssterberate um über 80 Prozent zurückgegangen. Magenkrebs rangiert nun weit hinter Dickdarm-, Prostata-, Brust- und Lungenkrebs. Die Daten besagen deutlich genug, dass diese erfreuliche Entwicklung wesentlich mit dem Rückgang von H. pylori zusammenhängt. Soweit die gute Nachricht.

Es scheint allerdings eine Kehrseite zu geben. Ärzte registrieren seit einigen Jahrzehnten zunehmend einst praktisch unbekannte schwere Erkrankungen der Speiseröhre. Seit den frühen 1970er Jahren erfassen Epidemiologen in den USA, in Großbritannien, Schweden und Australien einen alarmierenden Anstieg von Karzinomen der Speiseröhrenschleimhaut. Dieser höchst aggressive Krebs entsteht in Zonen gleich oberhalb des Magens. Kaum zehn Prozent der Patienten leben nach der Diagnose noch länger als fünf Jahre. In den USA steigt die Zahl der Neuerkrankungen jährlich um sieben bis neun Prozent: der Rekord unter den häufigen Krebsarten.



▲ **Das Bakterium *Helicobacter pylori* lebt in der Schleimschicht, die den Magen innen auskleidet.**

PHOTO RESEARCHERS / PHOTO INSOLITE REALITE & V. GREMET

Was könnte der Hintergrund sein? Als Hauptrisikofaktor für diesen Speiseröhrenkrebs gilt die so genannte Refluxkrankheit, eine chronische Entzündung, bei der saurer Mageninhalt in die Speiseröhre aufsteigt. Die Refluxkrankheit – oder Refluxösophagitis – haben Mediziner in der 1930er Jahren erstmals beschrieben. Seither nahm dieses Leiden schnell zu. Heute gehört es in den USA und anderen westlichen Ländern zu den eher häufigen Krankheiten. Das Fatale: Diese Krankheit kann sich zu einem so genannten Barrett-Ösophagus entwickeln, ein Zustand, den der englische Chirurg Norman Barrett 1950 beschrieb. Die Schleimhautzellen haben sich da bereits zu einem Krebsvorstadium verändert. Ein großer Teil dieser Patienten bekommt irgendwann den aggressiven Speiseröhrenkrebs.

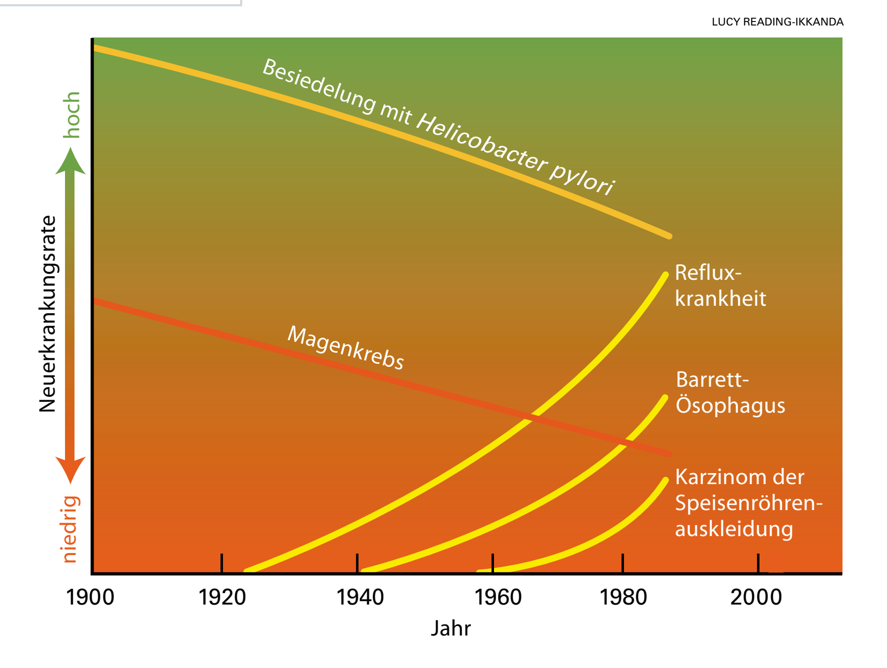
Die Zunahme beider Erkrankungen in den Industriestaaten verlief parallel (siehe Bild S. 88). Anscheinend kann die Refluxkrankheit bei manchen Patienten eine Entwicklung einleiten, bei der sich über zwanzig bis fünfzig Jahre hinweg ein Barrett-Ösophagus ausbildet und schließlich ein Karzinom. Der Vorgang ist durchaus den langsamen Veränderungen bei anderen, ähnlichen Krebsformen an Epithelien vergleichbar.

Der Anstieg dieser Speiseröhrenerkrankungen setzte gerade in der Zeit ein, als H. pylori seltener wurde. Man ist versucht, beides in Zusammenhang zu bringen. Als ich das aber 1996 tat, erhielt ich anfangs keine Resonanz und dann harte Kritik. Doch nun häufen sich seit einigen Jahren Befunde, die annehmen lassen, dass H. pylori vor der Refluxkrankheit und ihren Folgen schützen kann. Die Studien besagen sogar, dass insbesondere Stämme mit einem *cagA*-Gen dieses Speiseröhrenleiden abwehren.

Erhärteter Verdacht

Die Zusammenarbeit mit Forschern vom Nationalen Krebsinstitut der USA in Bethesda (Maryland) ergab 1998, dass mit solchen Stämmen Infizierte ein signifikant vermindertes Risiko für die aggressiven Schleimhautkarzinome der unteren Speiseröhre und des Mageneingangs aufweisen. Eine ähnliche Korrelation erwiesen Studien sowohl zur Refluxkrankheit als auch zum Barrett-Ösophagus, die Wissenschaftler an der Cleveland-Klinik (Ohio) und vom Erasmus-Medizinzentrum in Rotterdam gemeinsam mit uns durchführten. Arbeiten, die unabhängig davon in Großbritannien, Brasilien und Schweden stattfanden, bestätigten diese Resultate. Zwar gab es auch Untersuchungen, die den Zusammenhang nicht fanden – vielleicht weil die Forscher methodisch anders vorgegangen waren. Doch insgesamt sind die Hinweise überzeugend.

Wie ist der Effekt zu erklären? Wie kann ein Bakterium, das dem Magen schadet, der Speiseröhre nützen? Meiner Ansicht nach wirkt hier ein ausgeklügeltes Wechselspiel zwischen dem Erreger und seinem Wirt, das sich unter einem viele Jahrtausende währenden Selektionsdruck entwickelte. Sonderbarerweise hält es Helicobacter pylori im Magen ▷



Zwar sind die historischen Daten teilweise unvollständig, doch ein grober Trend scheint sich abzuzeichnen: Mit dem Rückgang von *H.-pylori*-Infektionen sank die Magenkrebsrate. Derweil nahmen einige Krankheiten der unteren Speiseröhre drastisch zu.

jahrzehntelang aus, obwohl sich unser Immunsystem dagegen wehrt. Möglich ist das nur, wenn sich der angerichtete Schaden lange genug einigermaßen in Grenzen hält. Der Wirt darf offenbar nicht zu bald sterben, damit die Mikrobe ausreichend Chancen hat, einen neuen zu finden. Darum muss sich zwischen Mikroorganismus und Mensch ein Gleichgewicht einstellen. Irgendwelche Gegenkräfte müssen bewirken, dass sich Entzündungen nicht zu sehr hochschaukeln. Ich vermute, dass die beiden Beteiligten Signale austauschen wie bei einem Regelkreis mit so genannter negativer Rückkopplung.

Rückkopplungsschleifen dieser Art kennt die Biologie viele. Zum Beispiel nutzen Zellen den Mechanismus oft, um sich abzustimmen. Nehmen wir die Blutzuckerregulation durch das Hormon Insulin: Wenn der Blutzuckerspiegel nach einer Mahlzeit ansteigt, setzt die Bauchspeicheldrüse Insulin frei. So können die Gewebe den Zucker aufnehmen. Sinkt daraufhin der Blutspiegel, ist dies ein Signal für die Bauspeicheldrüse, wieder weniger Insulin abzugeben. Das System hält in etwa ein Gleichgewicht aufrecht, indem es Höchst- und Tiefstwerte abfängt. Biologen nennen das Homöostase.

Diese Vorstellung möchte ich auf das System Mensch/Helicobacter übertragen, genauer gesagt auf die Mikroben und die Zellen der Magenwand. Über Jahre haben wir das Konzept verfeinert und ausgebaut – zusammen mit den Mathematikern Denise Kirschner von der Universität von Michigan in Ann Arbor und Glenn Webb von der Vanderbilt-Universität in Nashville (Tennessee). Die aktuelle Version sei kurz skizziert.

Nach diesem Konzept gehört zu einer Population von Helicobacter, die in einem Magen siedelt, eine Reihe miteinander sowohl kooperierender wie konkurrierender Stämme. Und zwar wetteifern sie um Nährstoffe, Lebensnischen im Magen oder auch Schutz vor menschlichen Abwehrmaßnahmen. Unser Organismus hat während der langen Koevolution gelernt, mit dem Erreger umzugehen und den Schaden möglichst gering zu halten.

Kompromiss von beiden Seiten

Er nimmt die Äußerungen der Bakterien als Signale, auf die er zu seinen Gunsten mit gegenregulierenden Maßnahmen antwortet – wie umgekehrt die Bakterien auch auf solche für sie ungünstigen Vorgänge im Magen im Laufe der Evolution Gegenstrategien entwickelt haben, auf die der Magen zu ihrem Vorteil reagiert. Zu den Signalen von menschlicher Seite gehören etwa Immunreaktionen, Veränderungen des Magendrucks oder des Säuregehalts des Magensafts. H. pylori kann seinen Wirtszellen beispielsweise signalisieren, den Stress auf ihn zu verringern.

Dazu ein Beispiel: Für die Mikrobe sind sowohl ein zu hoher wie ein zu niedriger Säuregrad ungünstig. Ein zu hoher Säuregehalt bringt die Bakterien um. Bei einem extrem schwachen Säurewert hingegen könnten weniger säuretolerante Mikroorganismen, wie das Darmbakterium Escherichia coli, im Magen die Oberhand gewinnen. Doch H. pylori vermag den Säuregehalt seiner Umgebung zu regulieren. Stämme mit dem *cagA*-Gen beispielsweise nutzen dazu das CagA-Protein als Signalmolekül. Herrscht ein zu starker Säurewert, bilden sie große Mengen des Proteins – denn die dadurch beim Wirt erzeugte Entzündung wirkt sich störend auf die hormonelle Regulation der Säureproduktion von Magenzellen aus. In dieser Weise sorgen die Bakterien selbst für eine Säureabnahme. Wird der Wert geringer, vermindert sich dadurch die Bildung des CagA. Auch die Entzündung schwächt sich nun ab.

Die gesundheitlichen Auswirkungen einer Helicobacter-Infektion hängen weit gehend davon ab, in welchem Maße und mit welcher Intensität Wirt und Erreger sich in dieser Weise austauschen. Dass das Magenkrebsrisiko durch Stämme mit dem *cagA*-Gen erheblich steigt, hängt sicher damit zusammen, dass solche Stämme die Magenzellen über Jahrzehnte mit dem CagA-Protein malträtieren. Stämme ohne das Gen schädigen das Magengewebe viel weniger.

Andererseits aber nützen Stämme mit einem *cagA*-Gen dazu, die Magensäureproduktion zu regulieren. Schon wenn die Bakterienpopulation das Gen nicht aufweist, werden Spitzenwerte weniger gedämpft. Bei Nichtinfizierten fehlt diese Kontrolle völlig, sodass starke Säureschwankungen mit hohen Spitzenwerten auftreten können. Das mag ein wesentlicher Faktor für die Speiseröhrenerkrankungen sein, die ja offensichtlich durch den Kontakt des Gewebes mit stark saurem Mageninhalt hervorgerufen werden.

Eine fehlende Infektion mit H. pylori könnte gesundheitlich noch ganz andere Auswirkungen haben. Zwei Magenhormone beeinflussen den Appetit: Leptin zügelt und Ghrelin fördert ihn. Patienten, bei denen H. pylori mit Antibiotika ausgemerzt wurde, bilden daraufhin oft weniger Leptin als vorher, aber mehr Ghrelin. Einer Studie zufolge nahm eine Patientengruppe nach einer solchen Therapie

stärker an Gewicht zu als eine Vergleichsgruppe. Da stellt sich die Frage, ob die beobachtete wachsende Zahl von Personen mit Übergewicht in den Industrienationen auch mit einer veränderten Mikroökologie des Menschen zusammenhängt. Sollte das tatsächlich zutreffen, müsste die Medizin erneut umlernen. Ärzte hätten fortan abzuwägen, ob ein Infizierter wirklich von Helicobacter befreit werden muss. Die Überlegung könnte schon deswegen lohnen, weil bei der Maßnahme unter Umständen auch andere einflussreiche Erreger mit verschwinden würden. Welche Therapie geraten ist, kann der Arzt nur im Einzelfall entscheiden, etwa nach dem Alter des Patienten, seiner medizinischen Vorgeschichte und seiner genetischen Veranlagung.

Ein Modell für neue Probiotika?

Gesetzt den Fall, es würde sich tatsächlich herausstellen, dass Helicobacter pylori manchen Menschen eher zum Nutzen als zum Schaden gereicht – sollten Ärzte denen das Magenbakterium sogar verordnen? Seit über hundert Jahren fahnden Mediziner und Heilpraktiker nach Probiotika – Präparaten mit speziellen Mikroorganismen, die der Gesundheit halber zugeführt werden. Die ersten Erprobungen galten den Lactobacillen. Ihre Arten dienen unter anderem zur Herstellung von Jogurt und Käse. Die Einnahme von Probiotika scheint in den meisten Fällen jedoch allenfalls marginal hilfreich. Hundert Jahre Suchen haben weit gehend eher nichts gebracht.

Die geringen Chancen frisch zugeführter Keime hängen auch mit den komplexen Lebensgemeinschaften der menschlichen Bakterienflora und deren verschlungener Evolution, mit der teils extremen Spezialisierung und Anpassung an bestimmte Biotope im Menschen zusammen. Gegenüber Neuankömmlingen sind die vorhandenen Erreger im Vorteil, denn sie konnten sich auf Dauer unter harten Bedingungen bewähren. Wie sollte ein fremdes Bakterium diesen Beziehungsdschungel zu seinen Gunsten neu gestalten können?

Dennoch mögen Probiotika eine Zukunft haben. Entscheidend hierfür wäre ein besseres Verständnis der mit uns lebenden Mikroorganismen, so auch ihrer Kommunikation mit dem Menschen. Meiner Meinung nach ereignen sich komplexe Wechselwirkungen, wo immer Mikroben unseren Körper besiedeln, sei es im Dickdarm, im Mund, auf der Haut oder in der Vagina. Wegen des Andrangs konkurrierender Organismen lassen sich diese Vorgänge aber nur schwer erkennen. Helicobacter pylori ist in dieser Hinsicht ein Sonderfall: Der Erreger beansprucht den Magen fast für sich allein. Er könnte nun zu einem Modellorganismus werden, um die Mikroökologie des Menschen zu erforschen.

Kennen die Wissenschaftler erst seine unzähligen Stämme und deren jeweiligen Einfluss auf die Magenzellen, könnte daraus ein ganz neues Arsenal an Maßnahmen gegen Erkrankungen des Verdauungstrakts erwachsen. Vielleicht bestimmen Ärzte zukünftig die genetische Disposition von Patienten für die erwähnten Entzündungen und Krebsformen und entscheiden dann, ob sie eine bestimmte Helicobacter-Mixtur verschreiben. Möglicherweise ließen sich manche Tricks des Magenbakteriums sogar anderweitig medizinisch einsetzen, zum Beispiel das VacA-Protein für eine neue Medikamentenklasse zur Unterdrückung von Immunfunktionen – so wie das Botulinustoxin zwar bedrohliche Nahrungsmittelvergiftungen hervorruft, aber inzwischen in der Schönheitschirurgie eingesetzt wird. Der mikroskopische Begleiter, der seit Urzeiten im menschlichen Magen mitreist, könnte zu einem neuen Begreifen unseres Körpers verhelfen. Das erweitert den Horizont der medizinischen Mikrobiologie. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Martin J. Blaser gehört zu den führenden Experten für *Helicobacter pylori*. Er ist Frederick-H.-King-Professor für Innere Medizin an der New-York-Universität. Dort leitet er die medizinische Abteilung und hat eine Professor für Mikrobiologie.

Helicobacter-pylori-Infektion und Magenkrebs – eine unterschätzte Beziehung. Von Hermann Brenner und Dietrich Rothenbacher in: Deutsches Ärzteblatt, Jg. 102, Heft 24, 17. Juni 2005, S. A 1740

Helicobacter pylori persistence: Biology and disease. Von Martin J. Blaser und John C. Atherton in: Journal of Clinical Investigation, Bd. 113, Nr. 3, S. 321, Februar 2004

Traces of human migrations in *Helicobacter pylori* populations. Von D. Falush et al. in: Science, Bd. 299, 7. März 2003, S. 1582

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter dem Stichwort »Inhaltsverzeichnis«.

Körpergröße und Wohlstand

Wirtschaftskraft bringt hohen Lebensstandard – so heißt es. Die Zusammenhänge erweisen sich aber als wesentlich komplexer, bezieht man auch biologische Wohlstandsindikatoren wie die Körpergröße ein.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Von John Komlos

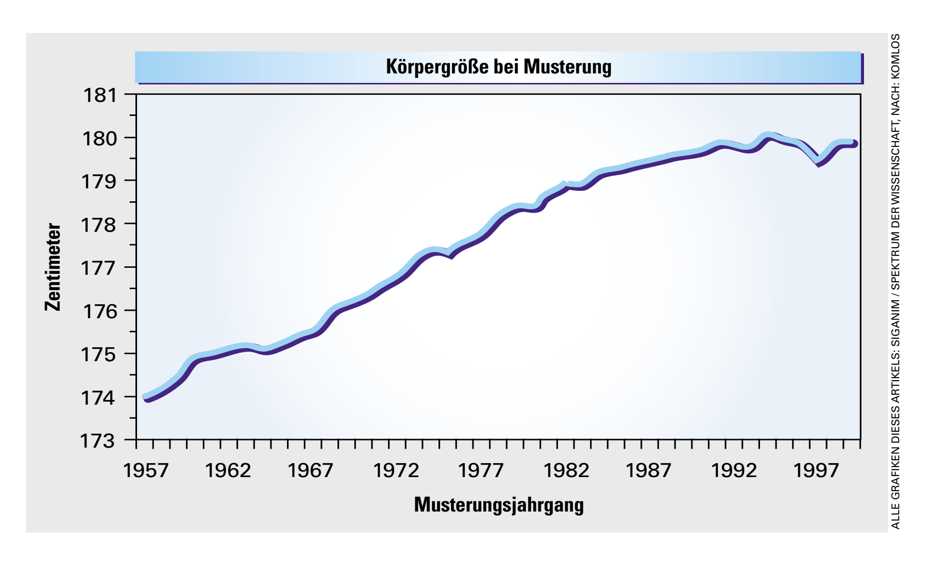
Wie gut geht es einem Land, wie gut seiner Bevölkerung? Ein rein ökonomisches Einkommens- und Wohlstandsdenken griffe hier zu kurz. Das Pro-Kopf-Einkommen etwa ist kein ausreichender Indikator für allgemeine Lebensqualität oder Wohlfahrt. Es kann konstant bleiben, obwohl ein Teil der Bevölkerung ärmer, ein anderer Teil dafür reicher geworden ist. Der Wert sagt also nichts über die Einkommensverteilung in der Gesellschaft aus. Außerdem berücksichtigt er den Lebensstandard von Kindern und Hausfrauen, die kein eigenständiges Einkommen haben, nur indirekt – dieser Kreis umfasst aber immerhin mehr als die Hälfte der Bevölkerung. Wirtschaftswachstum schafft auch nicht zwangsläufig bessere Lebensverhältnisse. Im Bruttosozialprodukt taucht weder die Umweltverschmutzung noch der Verbrauch natürlicher Ressourcen als Negativposten auf. Es reicht somit nicht, sich auf Einkommen, Wirtschaftswachstum oder Bruttosozialprodukt als Indikatoren des Wohlergehens zu beschränken.

Zwar gilt immer noch der alte Spruch »Lieber arm und gesund als reich und krank«, aber in der Realität ist der Zusammenhang eher anders. Denn die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bestimmen mit,

- wie gesund wir sind,
- wie lange wir leben,
- wie unsere körperliche und biologische Entwicklung verläuft, das heißt, wie groß wir als Erwachsene werden.

Seit dem »Wirtschaftswunder« zum Beispiel sind deutsche Männer in die Höhe geschossen, bei der Musterung bringen sie es auf durchschnittlich 6 Zentimeter mehr (siehe Grafik rechts oben). Doch nach der Wiedervereinigung stagnierte die Körpergröße im Westen – wahrscheinlich, so vermute ich, auf Grund der hinzukommenden

Die durchschnittliche Endkörpergröße einer Generation oder einer Geburtskohorte sagt etwas darüber aus, wie gut es dieser Bevölkerungsgruppe in den beiden ersten Lebensjahrzehnten ging. Größe ist somit ein Maßstab für den damaligen biologischen Lebensstandard.



Seit dem Wirtschaftswunder im Westen Deutschlands bis etwa zur Wiedervereinigung stieg die Körpergröße westdeutscher 19-jähriger Männer bei der Musterung. In Zeiten guter Konjunktur legt die Körpergröße im Allgemeinen zu.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

ökonomischen Probleme in den 1990er Jahren.

Im Allgemeinen nimmt die durchschnittliche Körpergröße einer Population in Zeiten guter Konjunktur zu, während sie in wirtschaftlich schlechten Zeiten stagniert oder sogar abnimmt. Selbst kurzfristige Schwankungen der Konjunktur, Zyklen von zwei bis sieben Jahren, beeinflussen biologische Prozesse wie das Körperwachstum. Dies wies 2003 Ulrich Woitek vom Institut für Empirische Wirtschaftsforschung in Zürich nach.

Wenn es uns gut geht, hat das freilich mit mehr zu tun als mit der bloßen Kaufkraft für Güter und Dienstleistungen. Auf den biologischen Lebensstandard, den wir anhand der durchschnittlichen Körpergröße messen, wirkt sich nämlich vieles aus. So besteht zwischen ihr und Faktoren wie Ernährung und Gesundheit eine positive Korrelation:

▸ Wenn Kinder und Jugendliche während ihrer Wachstumsphasen regelmäßig ausreichend energiereiche und gesunde Nahrung bekommen, keinen hohen Umweltbelastungen ausgesetzt sind, außerdem allgemeinmedizinisch gut versorgt werden, dann gedeihen sie besser. Krankheiten können Kinder weit im Wachstum zurückwerfen.

▸ Wenn schwangere Frauen sich gesund ernähren, unter ärztlicher Aufsicht stehen und sich keiner anstrengenden, körperlichen Arbeit aussetzen müssen, werden sie gesündere und größere Babys gebären.

▸ Nicht nur Einkommen und Preisniveau, sondern auch der Bildungsstand wirkt sich auf das Wachstum der Kinder aus. Eltern mit guter Ausbildung sind zumeist besser in der Lage, für ihre Kinder zu sorgen. Sie achten gewöhnlich auch stärker auf eine gesunde Ernährung.

▸ Eine Sozialpolitik, die Müttern, Kindern und Bedürftigen zugute kommt – kurzum: die finanzielle und medizinische Unterstützung durch den Staat in Form von Vorsorge- und Krankenversicherungssystemen beispielsweise –, fördert ebenfalls Gesundheit und Wachstum der Kinder.

Lebensstandard beinhaltet also viel mehr Faktoren, als der konventionelle Begriff erahnen lässt.

Einbußen nach dem Mauerbau

Was herkömmliche Indikatoren anbelangt, so besteht in manchen Fällen, wie in der ehemaligen DDR, ein zusätzliches Problem: Es mangelt hierfür an verlässlichen Daten. Die Untersuchung der Körpergröße in den neuen und alten Bundesländern eignet sich daher besonders, zwei genetisch eng miteinander verwandte Gesellschaften zu vergleichen. Da das Wachstum eines Menschen mit zwanzig abgeschlossen ist, sagt die heutige Körpergröße verschiedener Geburtsjahrgänge etwas über die Verhältnisse in den ersten beiden Lebensjahrzehnten aus. Die stärksten Wachstumsschübe nach der Geburt finden im ersten Lebenshalbjahr und in der Pubertät statt, ▷

▷ bei Mädchen etwa im Alter von elf bis sechzehn, bei Jungen etwa von dreizehn bis neunzehn Jahren.

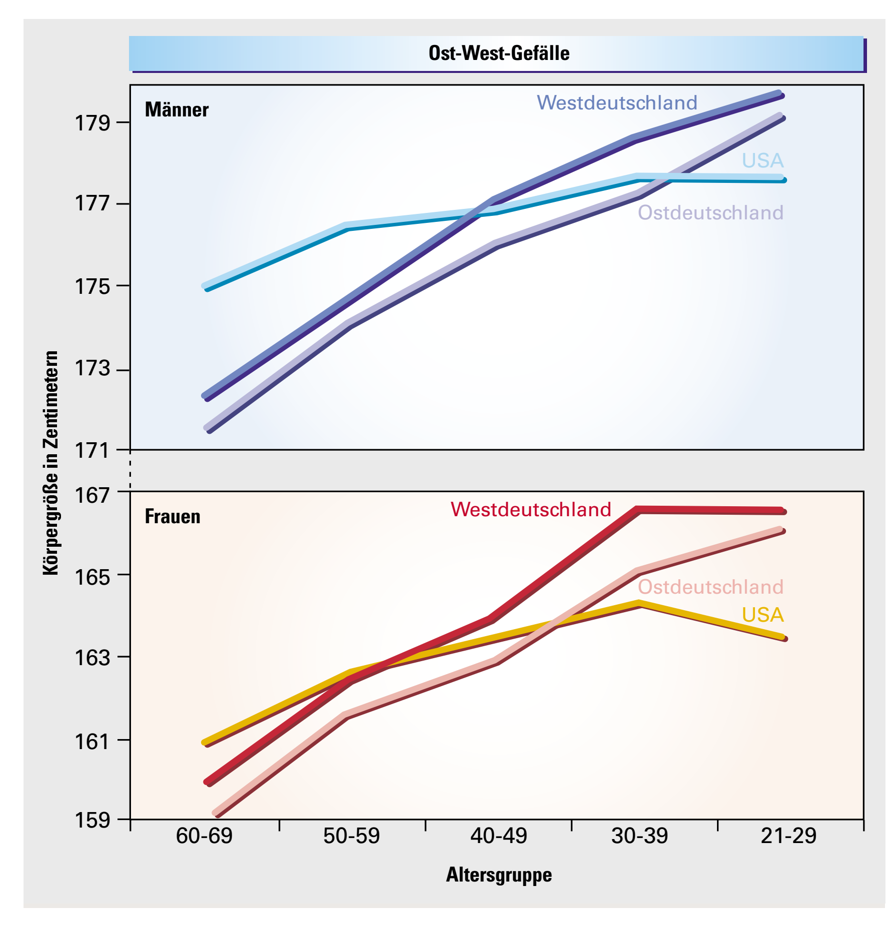
Unsere vor zwei Jahren veröffentlichte Auswertung des Bundesgesundheitssurvey von 1998 ergab, dass westdeutsche Männer, die zwischen 1951 bis 1960 geboren wurden, die ostdeutschen um 0,7 Zentimeter übertrafen. Der Unterschied verdoppelte sich jedoch für das Folgejahrzehnt mit zunehmender Isolierung der DDR nach dem Mauerbau von 1961. Besonders die dort drohende ökonomische Krise vertiefte die Kluft noch. Dem auf sozialer Marktwirtschaft basierenden westdeutschen Wohlfahrtsstaat war es also – anders als der DDR-Planwirtschaft – gelungen, seinen Bürgern einen biologisch höheren Lebensstandard zu bieten (siehe Grafik unten).

Entsprechend wirkten sich die gesellschaftspolitischen Veränderungen der Wiedervereinigung Deutschlands positiv auf das Körperwachstum in den neuen Bundesländern aus: Die Kluft zwischen ost- und westdeutschen Männern schließt sich bei den jüngsten Altersgruppen.

Anders die ostdeutschen Frauen: Sie holten in dieser Phase nicht so stark auf. Dafür und auch für anderes haben wir noch keine Erklärung: Warum zeigen ostdeutsche Frauen keinen »Mauerknick« wie die Männer, warum flacht stattdessen ihre Körpergröße später ab, wo die Männer zulegen? Und warum flacht die Kurve bei westlichen Frauen stärker ab als bei westlichen Männern?

Wie dem auch sei – der soziale Status machte sich ebenfalls in der Körpergröße bemerkbar. In der DDR war es aus ideologischen Gründen tabu, solche Unterschiede verschiedener sozialer Gruppierungen zu erforschen: Wie konnte es in einer klassenlosen Gesellschaft Klassenunterschiede geben? Dass sehr wohl welche in der ehemaligen DDR bestanden, genau wie im Westen, zeigte unsere anthropometrische Forschung. Die Differenz in der Körpergröße zwischen der ostdeutschen Ober- und Unterschicht beträgt bei Männern im Mittel 2,5 Zentimeter und bei Frauen 3,2 Zentimeter. Am stärksten unterscheiden sich dort Menschen, die im Jahrzehnt nach dem Mauerbau geboren wurden (siehe Grafik rechts oben). Offensichtlich verfehlte die DDR ihr Ziel einer klassenlosen Gesellschaft. Ober- und Unterschicht in Ost und West haben wir anhand einer Skala definiert, die Bildung und Einkommen misst. Im Westen sind die Unterschiede für diesen Zeitraum ungefähr gleich groß, nur geschlechtlich umgekehrt, nämlich ausgeprägter unter Männern.

Die Differenz zum Westen ist im Osten Deutschlands in der Altersgruppe am größten, die als Kind die Auswirkungen des Mauerbaus von 1960 zu spüren bekam. Im biologischen Lebensstandard hat der Westen schon länger die Wirtschaftsmacht USA überflügelt. Die deutschen Daten beziehen sich auf das Erhebungsjahr 1998.

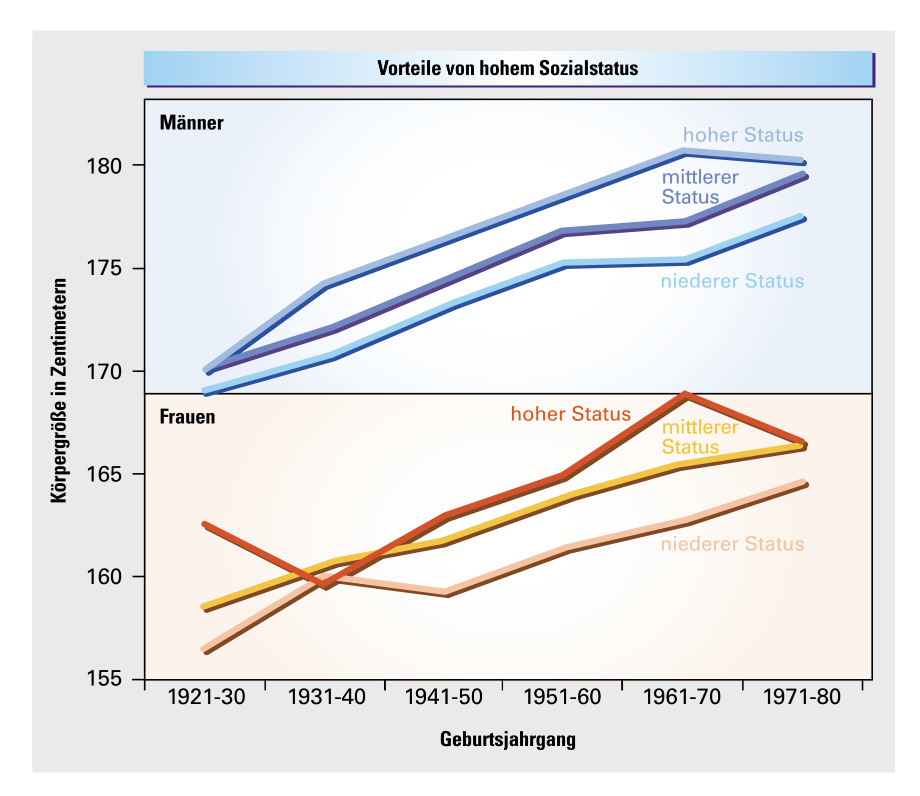


Dicker statt größer

Das Stadt-Land-Gefälle in der Körpergröße war im Osten viel eklatanter als im Westen, außerdem weiter verbreitet. Ostdeutsche Großstädter überragten Altersgenossen, die in kleineren Orten wohnten, im Durchschnitt um gut 2 Zentimeter. Bei den Frauen betrug der Vorsprung einen knappen Zentimeter. In Westdeutschland gab es dagegen nur selten wesentliche räumliche Unterschiede.

Wie die Diskrepanzen seinerzeit innerhalb der DDR verraten, war der Wohlstand auf dem Land wesentlich geringer als in der Stadt, außerdem die medizinische sowie die Lebensmittelversorgung flächig viel inhomogener als im Westen. Das hängt teilweise auch mit dem unterentwickelten Dienstleistungssektor im Osten zusammen. Dort arbeiteten 38 Prozent der Beschäftigten in diesem Sektor, im Westen waren es hingegen 57 Prozent. Solche grundsätzlichen Erkenntnisse – wie die Planwirtschaft der DDR den biologischen Wohlstand ihrer Bürger tatsächlich beeinflusst hat – lassen sich mit konventionellen Indikatoren nicht gewinnen.

Dass westeuropäische Wohlfahrtsstaaten gegenüber den ehemaligen sozialistischen Planwirtschaften des Ostens einen höheren biologischen Lebensstandard aufweisen, mag nicht verwundern – sehr wohl aber, dass sie gegen Ende des 20. Jahrhunderts sogar das eher kapitalistische Amerika überflügelt hatten. Das war lange anders. Schon in den Kolonialzeiten brachte es der amerikanische Durchschnittsmann auf 173 Zentimeter. Um die Mitte des 19. Jahrhunderts wa-



Der ehemaligen DDR gelang es nicht, eine klassenlose Gesellschaft zu schaffen. Personen mit hohem Status – gemessen an Bildung und Einkommen – ging es in den kritischen Zeiten nach den Mauerbau von 1960 deutlich besser, sichtbar an der heutigen Körpergröße jener, die zwischen 1961 und 1970 geboren wurden.

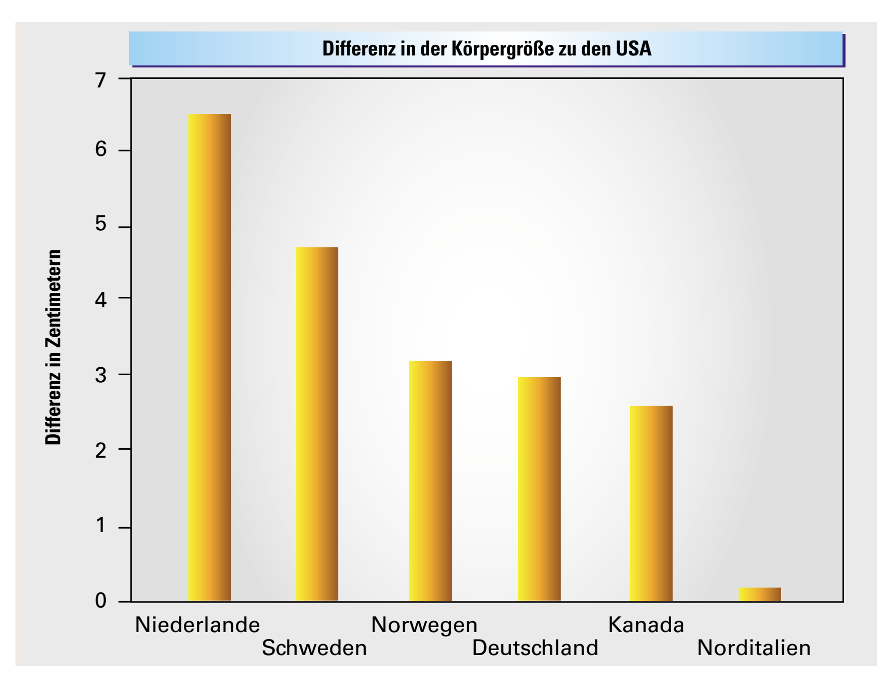
ren die Amerikaner um 5 bis 7 Zentimeter größer als die Europäer und damit die »Größten« der Welt. Die reichhaltigen natürlichen Ressourcen und die geringe Bevölkerungsdichte verschafften ihnen einen beträchtlichen biologischen Lebensstandard.

Das Überraschende: Die Amerikaner sind seitdem nur wenig gewachsen, dafür aber fettleibiger geworden. (Einwanderer und US-Bürger lateinamerikanischer Herkunft, die ja einen anderen genetischen Hintergrund aufweisen, wurden von dieser und weiteren Statistiken ausgeschlossen). Die Europäer gewannen hingegen im gleichen Zeitraum um 10 bis 18 Zentimeter an Höhe. Den Vorsprung gegenüber West- und Nordeuropa verloren die Amerikaner endgültig nach dem Zweiten Weltkrieg, trotz ihres höheren Pro-Kopf-Einkommens (siehe Grafik links). Nahe liegende Gründe dafür sind:

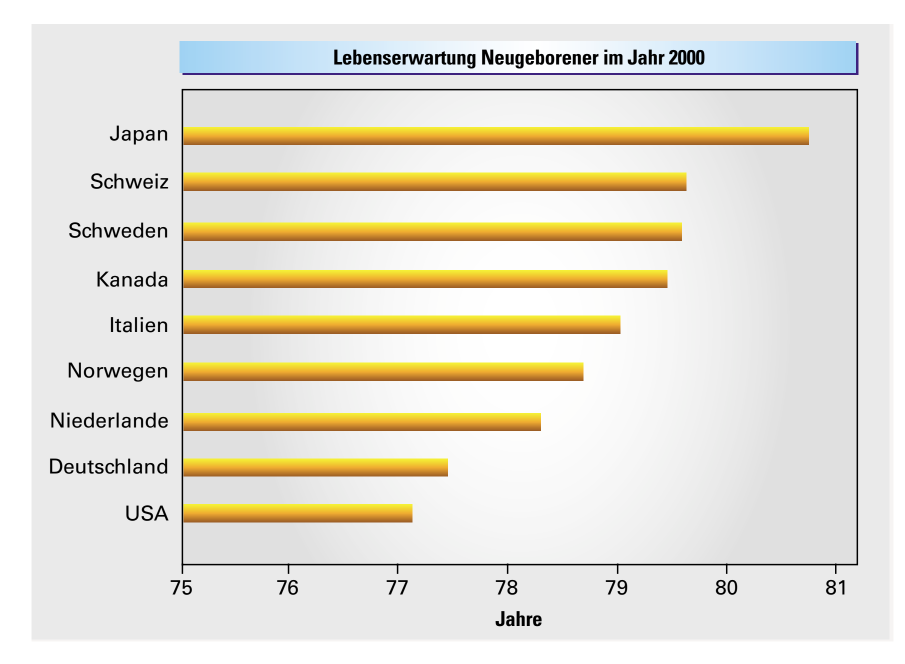
- ungesunde Ernährung,
- die erforderliche private Krankenversicherung, die sich nicht alle leisten können,
- größere und weiter wachsende soziale Ungleichheit,
- gesundheitswidrige Gettos in den Städten, wie sie in den west- und nordeuropäischen Wohlfahrtsstaaten nicht mehr vorkommen,
- weniger als die Hälfte der amerikanischen Arbeitslosen bezieht staatliche Unterstützung.

Besonders deutlich zeigt sich die soziale Ungleichheit und Armut in den USA im Gesundheitssystem; denn 14 Prozent der Bevölkerung – immerhin mehr als 40 Millionen Menschen – besitzen überhaupt keine Krankenversicherung. Zudem ist nicht jeder Arbeitgeber dazu bereit, seinen Arbeitnehmern eine solche Versicherung anzubieten. Das steht im krassen Gegensatz zu West- und Nordeuropa, wo die Bevölkerung fast zu 100 Prozent eine staatliche Krankenversicherung und Grundversorgung genießt. Dort fängt das Sozialsystem verarmte Menschen, Arbeitslose, Alleinerziehende und Obdachlose auf. Tatsächlich sind die Holländer, Schweden und Norweger derzeit die »Größten« der Welt. Selbst Deutsche überragen Amerikaner um einiges (siehe Grafik unten).

Erstaunlich sind auch andere Werte. Die Sterblichkeitsrate amerikanischer Säuglinge ist die höchste in den OECD-Ländern – doppelt so hoch wie in Schweden. Zudem liegt die derzeitige ▷



Gemessen an der Körpergröße ist der biologische Lebensstandard in den west- und nordeuropäischen Wohlfahrtsstaaten am höchsten. Der Vorsprung gegenüber der US-Bevölkerung (ohne Latinos), in der erhebliche soziale Ungleichheit besteht, beträgt bei den Niederländern beispielsweise mehr als sechs Zentimeter.



Die USA sind auch keineswegs führend hinsichtlich der Lebenserwartung, wie diese vergleichende Auswahl von Industrieländern zeigt. Die US-Säuglingssterblichkeit ist sogar die höchste in den OECD-Ländern, ebenfalls ein Zeichen für einen mäßigen biologischen Lebensstandard.

▷ Lebenserwartung in den USA anderthalb Jahre unter der in den skandinavischen Ländern und drei Jahre unter der in Japan (siehe Grafik oben). Dies ist ein gravierendes Indiz dafür, dass sich der wirtschaftliche Erfolg der USA nicht – wie erwartet – auf den Gesundheitszustand und den biologischen Lebensstandard auswirkt. Bei einer Meinungsumfrage schätzten Amerikaner aller Altersstufen im Vergleich zu Deutschen ihren eigenen Gesundheitsstatus als wesentlich schlechter ein. Dabei gibt die USA jährlich 14 Prozent ihres Bruttosozialprodukts für das Gesundheitswesen aus, fast zweimal so viel wie Westeuropa. Groß und schlank am Anfang des Jahrhunderts, präsentiert sich uns die amerikanische Bevölkerung hundert Jahre später zwar noch immer als reich, aber zugleich als verhältnismäßig klein und dick.

Kleine Eiszeit – kleine Männer

Das anthropometrische Forschungsprogramm meiner Arbeitsgruppe, das seit zwei Jahrzehnten läuft, eröffnet viele neue Perspektiven. Wer hätte geahnt, welch gravierende Rückschläge es in der Vergangenheit bei der Entwicklung der Körpergröße gab? Die menschliche Physiologie ermöglichte offensichtlich eine flexible Anpassung an die Ernährungssituation. In schlechteren Zeiten konnten wir daher mit weniger Ressourcen auskommen, was die Überlebenschancen erhöhte. Ein schlagendes Beispiel sind die mit 162 Zentimetern außerordentlich kleinen französischen Männer unter Louis XIV. im 17. Jahrhundert. Ihre geringe Körpergröße lässt sich vorwiegend auf schlechte Ernten zurückführen, verursacht durch ungünstige klimatische Bedingungen der so genannten kleinen Eiszeit. Somit sind innerhalb der letzten drei Jahrhunderte unter Westeuropäern Schwankungen von bis zu 21 Zentimetern zu beobachten, mit den damaligen Franzosen an der Basis und den heutigen Niederländern an der Spitze.

Und wer hätte geahnt, dass der biologische Lebensstandard – gemessen an der Körpergröße – selbst in kurzer Zeit so empfindlich auf die Wirtschaftskonjunktur reagiert. Ein Beispiel aus der deutschen Vergangenheit ist das Wiederaufrüstungsprogramm unter der NSDAP-Regierung. Es brachte insgesamt eine Vernachlässigung der Gesundheitsvorsorge mit sich, mit bisher übersehenen ungünstigen Auswirkungen auf die Mortalitäts- und Erkrankungsraten der deutschen Bevölkerung. Dies haben Jörg Baten von der Universität Tübingen und Andrea Wagner von der Ludwig-Maximilians-Universität München vor Kurzem gezeigt. Trotz steigenden Bruttoinlandsprodukts entwickelte sich der biologische Lebensstandard unter der NSDAP-Regierung bereits vor Ausbruch des Kriegs ungünstig.

Das anthropometrische Forschungsprogramm hat auch sozialpolitische Implikationen. Die soziale Marktwirtschaft sowohl in Deutschland als auch in den anderen Wohlfahrtsstaaten Westeuropas und Skandinaviens sichert ihren Bürgern einen höheren biologischen Lebensstandard als die mehr an der freien Marktwirtschaft orientierte Ökonomie Amerikas. Die Einrichtungen eines Wohlfahrtsstaats sollten deshalb so weit wie möglich erhalten und weiter entwickelt werden. An der Spitze der Nationen, die einen hohen biologischen Lebensstandard bieten, stehen Holland, Norwegen und Schweden. Sie sollten anderen als Vorbild dienen. Sich ausschließlich auf das Pro-Kopf-Einkommen zu konzentrieren wäre falsch. Es ist weit davon entfernt, ein allumfassender Indikator der Lebensqualität zu sein. Anders gesagt: Die Wohlhabendsten sind nicht unbedingt auch die Größten, die Gesündesten oder die Langlebigsten. Deshalb stellt der biologische Lebensstandard eine sinnvolle Ergänzung zu den konventionellen Wohlfahrtsindikatoren dar. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



John Komlos leitet das Seminar für Wirtschaftsgeschichte an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seine Forschungsschwerpunkte liegen außer auf dem biologischen Lebensstandard unter anderem auf dem Einsatz quantitativer Methoden und Wirtschaftstheorien bei historischen Analysen.

Soziale Schicht und Körpergröße in Ost- und Westdeutschland. Von P. Kriwy et al. in: Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Bd. 3, Nr. 3, S. 543, 2003

From the tallest to (one of) the fattest: The enigmatic fate of the size of the american population in the twentieth century. Von J. Komlos und M. Baur in: Economics and Human Biology, Bd. 2, Nr. 1, S. 57, 2004

Autarchy, market disintegration, and health: the mortality and nutritional crisis in Nazi Germany, 1933 – 1937. Von J. Baten und A. Wagner in: Economics and Human Biology, Bd. 1, Nr. 1, S. 1, 2003

The making of giants in a welfare state: The norwegian experience in the 20th century. Von M. Sunder in: Economics and Human Biology, Bd. 1, No. 2, S. 267, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

INTERVIEW

Jeden Tag eine Innovation

2004 trennte sich Bayer von seiner Chemiesparte. Die Konzentration auf Pflanzentechnik, Materialien und Pharma hat auch mit der Kostenexplosion in der Forschung zu tun, erläutert Bayer-Vorstand Udo Oels.

Herr Dr. Oels, »Science for a better life« lautet der aktuelle Werbeslogan der Bayer AG. Wie groß wird Forschung in Ihrem Unternehmen geschrieben?

Sehr groß! Bayer wäre ohne Forschung und Entwicklung gar nicht denkbar. Wir sind ein Erfinder-Unternehmen, das durch bahnbrechende Innovationen groß geworden ist – denken Sie nur an Aspirin oder an Kogenate, unser erstes biotechnologisch hergestelltes Präparat für Bluter. Auch die Polyurethane wurden bei Bayer erfunden – ebenso wie Imidacloprid, ein Meilenstein in der Erforschung von Pflanzenschutzmitteln.

Das ist die Vergangenheit. Wie sieht die Zukunft aus?

Wir haben unsere Forschung stark konzentriert, um durch die Bündelung von Ressourcen auf bestimmte Bereiche die Erfolgsaussichten zu verbessern. So konzentrieren wir uns in der Arzneimittelforschung auf Krebs, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Diabetes. In der Landwirtschaft helfen wir mit unseren Produkten, Ernteausfälle in aller Welt erheblich zu reduzieren. Derzeit arbeiten wir daran, Nutzpflanzen so zu verbessern, dass die Menge und Qualität von Nahrung, Futtermitteln und Fasern gesteigert werden kann. Bei den hochwertigen Materialien ist Bayer unter anderem mit dem vielseitigen Kunststoff Makrolon erfolgreich, der die Entwicklung der CD und DVD erst möglich gemacht hat. Aktuell forschen wir an neuen holografischen Speichermaterialien, mit deren Hilfe man den Inhalt von ganzen Bibliotheken auf einer einzigen Scheibe archivieren kann.

> Wir sind offen für jeden Input, der zum Erkenntnisgewinn beiträgt

Hat die 2004 erfolgte Aufteilung der Bayer AG in die Teilkonzerne MaterialScience, CropScience und HealthCare auch etwas mit Ihrem F&E-Engagement zu tun?

Das Ziel der strategischen Neuausrichtung von Bayer war es, das Unternehmen auf innovations- und wachstumsstarke Gebiete zu konzentrieren. Das sind für uns die Bereiche Gesundheit, Ernährung und hochwertige Materialien – also Felder, in denen wir nicht nur über starke Marktpositionen verfügen, sondern auch über exzellente Technologien und großes Forschungspotenzial. Es war also eine strategische Entscheidung.

Von Ihrer Traditionssparte Chemie haben Sie sich im Zuge der Neuausrichtung getrennt. Hat die deutsche chemische Industrie in Ihren Augen kein Innovationspotenzial mehr – oder gehen Sie nur der geplanten restriktiven Neuregelung des EU-Chemikalienrechts aus dem Weg?

Wir haben weder den Glauben an die Chemie verloren noch versucht, dem Chemikalienrecht aus dem Weg zu gehen, welches uns bei den Polymeren ohnehin erhalten bleibt. Klar ist: Forschung wird immer kostenintensiver. Da kann man nicht mehr im Gießkannenverfahren vorgehen, sondern muss sich auf bestimmte Gebiete konzentrieren. Deshalb haben wir uns entschlossen, unsere gesamten Finanzmittel und Management-Ressourcen auf jene Bereiche zu fokussieren, in denen wir kompetent sind und größte Chancen zur Verwirklichung unseres Ziels sehen: Innovation und Wachstum. Und unsere großen Stärken liegen nun einmal in den Bereichen Gesundheit, Landwirtschaft und hochwertige Materialien – also Feldern mit hohem Wachstumspotenzial, aber auch großem Innovationsbedarf. Dagegen bewegt sich die Chemie in eher reiferen Märkten, die nicht mehr so stark von der Forschung bestimmt werden.

Bayer hat im vergangenen Jahr 2,1 Milliarden Euro in Forschung und Entwicklung investiert. Wie wird es dieses Jahr aussehen, und wie verteilen sich die





STECKBRIEF

Udo Oels

›› Jahrgang 1944
›› Studium der Chemie mit anschließender Promotion an der Technischen Universität Hannover
›› 1976 Eintritt bei der Bayer AG
›› 1990 Forschungschef des Geschäftsbereichs Organische Chemikalien
›› seit 1996 als Vorstand zuständig für Innovation, Technologie und Umwelt



ALLE FOTOS: BAYER AG

Mittel auf die drei neuen Teilkonzerne?

Für 2005 haben wir erneut rund zwei Milliarden Euro für F&E eingeplant. Etwa die Hälfte wird in den Bereich HealthCare fließen und rund ein Drittel in den Bereich CropScience. Alle drei Teilkonzerne verfügen damit über Forschungsmittel, die gemessen am Umsatz im jeweiligen Branchenvergleich ein Spitzenniveau haben.

Woher kommen die entscheidenden Impulse für Innovation: Nachfrage des Marktes, Geistesblitze der Mitarbeiter, Weitblick der Chefs?

Einen Impuls haben Sie vergessen: Fortuna! Auch oder gerade in der Forschung gehört ein wenig Glück dazu! Aber, Spaß beiseite: Forschung muss natürlich strategisch geplant werden. Wir planen Innovationen, indem wir unsere Mittel für die Forschung effektiv und zielgerichtet einsetzen: So bilden wir Forschungsschwerpunkte, in denen wir über umfassende Kompetenzen verfügen – etwa im Bereich Pharma. Oder wir arbeiten eng mit unseren Industriekunden zusammen und entwickeln genau die Materialien, die unsere Kunden für ihre Produkte brauchen und die mit verbesserten Eigenschaften den Fortschritt ausmachen. Natürlich spielen auch die Kreativität und der Erfindungsreichtum unserer Wissenschaftler eine erhebliche Rolle. Bei allem sind wir offen für jeden Input, der zum Erkenntnisgewinn beiträgt – von unseren Kunden, von öffentlichen Forschungseinrichtungen, von Mitarbeitern – und natürlich erwarten wir auch ein Forschungsmanagement mit Weitblick!

Wie organisieren Sie bei Bayer Innovation? Und welche Rolle übernimmt die Bayer Innovation GmbH?

In unserer Holding-Struktur ist die Forschung den Teilkonzernen übertragen. Sie verantworten ihre F&E-Budgets und setzen die Prioritäten für ihr jeweiliges Unternehmen. Die Bayer Innovation GmbH hingegen soll dazu beitragen, unter der Regie der Konzernholding innovative Projektideen zu neuen, tragfähigen Konzepten zu entwickeln. Dabei geht es nicht nur um innovative Produkte, sondern auch um vollkommen neue Geschäftsgebiete außerhalb der Portfolios unserer derzeitigen Teilkonzerne. Daraus können sich sowohl neue Geschäftsfelder für den Konzern ergeben als auch Ausgründungen als Start-up oder die Umsetzung durch Dritte.

Für die Pflanzen-Biotechnologie wird sich breite Zustimmung einstellen, sobald dem Verbraucher der Nutzen in Form von wertvollen Produkten zugute kommt

Manche Firmen lagern ihre Forschung aus. Bayer auch?

Nein, als innovativ ausgerichtetes Unternehmen gehören unsere Forschungszentren zum integralen Bestandteil unserer Kernaktivitäten. Aber selbstverständlich haben wir zusätz- ››



›› lich ein breit angelegtes Forschungsnetzwerk rund um den Globus installiert. Dazu gehören zahlreiche Jointventures mit Biotechnologie-Unternehmen ebenso wie Kooperationen mit Hochschulen und Instituten.

Welche Innovationen dürfen wir künftig von Bayer erwarten?

Man kann in der Forschung nie etwas versprechen – aber Sie dürfen noch einiges von Bayer erwarten. Im Durchschnitt melden wir an jedem Arbeitstag ein neues Patent an – und jedes Patent steht für eine Innovation. Viele davon fließen in Produkt- oder Verfahrensverbesserungen ein, ohne dass der Endverbraucher sie bewusst registriert. Bei Medikamenten ist die Wahrnehmung eine andere: Viele Patienten warten dringend auf neue Arzneien. Wir haben derzeit zwei viel versprechende Entwicklungskandidaten – ein Mittel gegen fortgeschrittenen Nierenkrebs, das wir 2006 auf den Markt bringen wollen, und unseren Faktor-Xa-Inhibitor gegen die gefürchteten Thrombosen. Langfristig können wir uns vorstellen, dass Pflanzen als nachwachsende Rohstoffe zum Beispiel Öl ersetzen oder als Lieferanten für Arzneiwirkstoffe genutzt werden können. Das ist eine faszinierende Perspektive, für die wir allerdings die Grüne Gentechnik brauchen …

… die teils noch immer heftig umstritten ist!

In Deutschland vielleicht. In vielen anderen wichtigen Ländern gilt die Biotechnologie längst als Schlüssel für die zukunftsorientierte Lösung zahlreicher Probleme. Ich darf in diesem Zusammenhang daran erinnern, dass es noch vor wenigen Jahren in der breiten Öffentlichkeit auch erhebliche Bedenken gegen die »Rote Gentechnik« gab, mit deren Hilfe in der Pharmazie inzwischen zahlreiche Krankheiten erfolgreich behandelt werden können und die international weit gehend Anerkennung gefunden hat. Kogenate ist ein Beispiel dafür.

Was macht Sie so optimistisch in Bezug auf den Meinungsumschwung?

Ich glaube, dass sich die breite Zustimmung auch für die Pflanzen-Biotechnologie einstellen wird, sobald dem Verbraucher der Nutzen in Form von wertvollen Produkten zugute kommt. Denn Biotechnologie hat ein bedeutsames Innovationspotenzial. Deutschland darf den Anschluss bei dieser Zukunftstechnologie allerdings nicht verlieren, wenn wir Schaden für den Forschungs- und Innovationsstandort vermeiden wollen. Mit Hilfe der Biotechnologie wird sich in Zukunft aber nicht nur der landwirtschaftliche Ertrag steigern, sondern speziell die Qualität der Nutzpflanzen verbessern lassen. So arbeiten unsere Wissenschaftler an molekularbiologisch veränderten Kartoffelknollen, aus denen sich modifizierte Stärke für zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten gewinnen ließe. Und Baumwollfasern sollen so modifiziert werden, dass sie leichter zu färben, weniger knitterungsanfällig und Wasser abweisend sein könnten.

Sie sind selbst Chemiker. Würden Sie sagen, dass Menschen mit naturwissenschaftlichem Hintergrund allgemein mehr Einfluss auf Unternehmensziele, Strategie und Umsetzung in einem Unternehmen haben sollten?

Das kann man so pauschal nicht sehen. Ich gehe davon aus, dass Spitzenmanager deshalb in ihre Funktion berufen wurden, weil sie keinen Scheuklappenblick haben. Die Herkunftsfakultät spielt also keine Rolle, sondern die Fähigkeit, die Kompetenz aus verschiedenen Disziplinen im Führungskreis zusammenzuführen und zu nutzen. Ich hielte es für vermessen, Naturwissenschaftlern per se eine Generalkompetenz zuzumessen. Manche Wissenschaftler in der Industrie müssen allerdings noch lernen, dass in einem Unternehmen die Forschungsmittel durch Produktverkauf generiert werden.

Abschließende Frage: Halten Sie das gesellschaftliche und politische Klima in Deutschland für innovationsfeindlich?

Wir sind bis zu einem bestimmten Punkt gut. Wir wollen Fortschritt. Aber im entscheidenden Moment – wenn es um konkrete Veränderungen und den Mut zum Risiko geht – stehen wir uns selbst im Weg und überlassen das Feld anderen. Deshalb wurden zahlreiche Erfindungen aus Deutschland in anderen Ländern zu Produkten umgesetzt – beispielsweise in der Kommunikationstechnologie. Oder wir fördern die Forschung in der bereits genannten Biotechnologie und schließen sie per Gesetz teilweise von der Erprobung in Deutschland wieder aus. Innovation braucht Begeisterung! Doch die ist in Deutschland zu selten zu spüren. Wir müssen jedoch höllisch aufpassen, technologisch nicht den Anschluss an die Weltspitze zu verlieren. Denn in einem Land ohne große Rohstoffvorkommen lebten wir lange Zeit allein von unserer Kreativität und unserem Erfindungsreichtum. Diese Pfunde dürfen wir nicht durch gesellschaftliche und politische Fehlentwicklungen aufs Spiel setzen. Nicht zu vergessen: Gerade neue Technologien schaffen neue Arbeitsplätze!

> Innovation braucht Begeisterung.
> Doch die ist in Deutschland zu selten zu spüren

Die Fragen stellten **Carsten Könneker** und **Thomas Wingerter**.

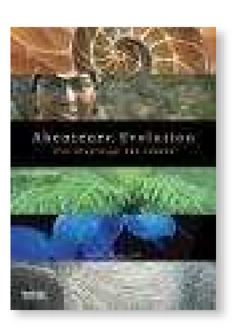
BIOLOGIE

Walter Kleesattel

Abenteuer Evolution

Die Ursprünge des Lebens

Theiss, Stuttgart 2005. 144 Seiten, € 29,90 (bis 31. 12. 2005, danach € 36,–)



Etwa 1,8 Millionen Arten – Gruppen von Lebewesen, die untereinander fruchtbare Nachkommen zeugen können – sind heute bekannt. Doch das ist nur ein Bruchteil der tatsächlichen biologischen Vielfalt auf unserer Erde. In den weit gehend unbekannten Lebensgemeinschaften des Kronendachs der tropischen Regenwälder, der Korallenriffe und des Tiefseebodens verbergen sich vermutlich etwa 30 Millionen noch nie beschriebener Arten.

Der promovierte Zoologe und Sachbuchautor Walter Kleesattel geht mit dem Leser auf eine Reise in diese bunte Welt der Biodiversität, vor allem dorthin, wo die Evolution einen ungewöhnlichen Artenreichtum hervorgebracht hat. Die 25 bisher als »Hot Spots« definierten Regionen umfassen nur zwei Prozent der Erdoberfläche, beherbergen aber rund 44 Prozent aller Pflanzen- und 38 Prozent aller Wirbeltierarten.

Mal hebt Kleesattel ein Blatt vom Boden des malaiischen Regenwalds, in dem 5000 verschiedene Baumarten gedeihen, mal taucht er an den 300 Kilometer langen Korallenriffen vor dem mittelamerikanischen Belize, mal folgt er den »fliegenden« Spinnen, die sich auf der Insel Krakatau niederließen, nachdem der Ausbruch des Vulkans alles Leben ausgelöscht hatte. Neben den lebenden Wesen erzählt er von den ausgestorbenen: Vor unserem geistigen Auge erscheinen Dodos, Zwergelefanten und der urtümliche Stummelfüßer *Hallucigenia*, den die Paläontologen im Wortsinn vom Kopf auf die Füße stellen mussten, um ihn richtig einzuordnen.

Der Autor integriert die entscheidenden Theorien gut dosiert in seine locker geschriebenen Reportagen und scheut sich nicht, auch Kontroversen anzusprechen. Gleich nach den Beuteltieren im prähistorischen Südamerika und im heutigen Australien folgt das Prinzip der adaptiven Radiation: Populationen einer Art besetzen ökologische Nischen und verändern sich, bis sie schließlich eine neue Art bilden. Das geschieht besonders dann, wenn die Populationen geografisch isoliert sind. So wurden die Tiere auf Malta nach dem Wegfall der Landbrücke zu Sizilien kleinwüchsiger, bis hin zu Zwergelefanten, die nicht größer als ein Bernhardiner waren.



Die leuchtenden Farben der Baumsteigerfrösche warnen vor ihren außerordentlich giftigen Hautausscheidungen.

Nachdem Kleesattel die Mechanismen der Evolution und deren Auswüchse erklärt hat, skizziert er chronologisch die Entwicklung des Lebens vom Archaikum vor 4 Milliarden Jahren bis zur Gegenwart. Mit der reichen Bebilderung – alle Fotos stammen vom Autor – und seinem lockeren Reportagestil gelingt es Kleesattel, den Leser kurzweilig an ein vielschichtiges Thema heranzuführen. Ein Buch, das auch Kindern ab etwa 12 Jahren empfohlen sei.

Thomas Brock

Der Rezensent studiert Ur- und Frühgeschichte und arbeitet als Journalist und Museumspädagoge in Hamburg.



KOSMOLOGIE

Brian Greene

Der Stoff, aus dem der Kosmos ist

Raum, Zeit und die Beschaffenheit der Wirklichkeit

Aus dem amerikanischen Englisch von Hainer Kober.
Siedler, München 2004. 640 Seiten, € 28,–

Es beginnt mit einer ganz alltäglichen Beobachtung: Versetzt man das Wasser in einem Eimer, zum Beispiel durch kräftiges Rühren, in Rotation, so steigt es an den Eimerwänden hoch und nimmt dadurch eine konkav gekrümmte Oberfläche an. Warum?

Zentrifugalkraft, Scheinkräfte, rotierendes Bezugssystem, Gleichberechtigung aller Bezugssysteme, Relativitätstheorie, ein Eimer mit Wasser mutterseelenallein im ansonsten völlig leeren Kosmos rotierend: Mit ein paar kühnen Gedankensprüngen hüpft Brian Greene von dem biederen Wasserbehälter, der schon Isaac Newton als Denkhilfe – und als Argument für die Existenz eines absoluten Raums – diente, bis zu fundamentalen und bis heute ungelösten Fragen von Raum und Zeit.

Von zwei geradlinig gleichförmig gegeneinander bewegten Bezugssystemen ist eins so gut wie das andere, ein absolut gültiges gibt es nicht; die Spezielle Relativitätstheorie lehrt uns, wie diese Erkenntnis mit der absoluten Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zu vereinbaren ist. Aber mehrere gegeneinander rotierende Bezugssysteme sind nicht in diesem Sinn gleichberechtigt. Gibt es unter ihnen ein ausgezeichnetes, »das richtige« Bezugssystem? Wenn ja, ist es nur durch die Bewegung der Materie im Raum definiert oder durch den Raum selbst, was auf eine partielle Wiederauferstehung des eigentlich beerdigten absoluten Raums hinausliefe?

Das war nur die Ouvertüre dieses Buchs. Brian Greene, Professor für Physik an der Columbia-Universität in New York, hat seinem Erstling »Das elegante Universum« (Spektrum der Wissenschaft 8/2000, S. 106), der zum Bestseller wurde, ein Monumentalwerk folgen lassen. Was immer in den letzten Jahrzehnten die Gemüter der theoretischen Physiker und vor allem der Kosmologen bewegte – Greene schreibt darüber.

Wie kann es sein, dass die Messung eines Quantenzustands augenblicklich und unter Missachtung der (Licht-)Geschwindigkeitsbeschränkung einen mit diesem verschränkten Quantenzustand beeinflusst? Von dieser »spukhaften Fernwirkung« gibt es zahlreiche, noch paradoxere Varianten, darunter solche mit Zeitverzögerung. Ob ich heute eine Messung vornehme oder auch nicht, scheint Ereignisse zu beeinflussen, die vor zehn Jahren stattgefunden haben. Solcherart auf die Spitze getrieben, weist das Paradox den Weg zu seiner Lösung: Es sind nicht die Ereignisse, die sich nachträglich verändern, sondern unsere Interpretation derselben; nur ist es in der Quantenmechanik manchmal sehr schwer, das eine vom anderen zu unterscheiden.

Wie kommt es, dass die Entropie des Universums beständig zunimmt, obgleich keines der fundamentalen physikalischen Gesetze einen Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft macht? Es sind die Anfangsbedingungen, die eine Richtung der Zeit (den »Zeitpfeil«) festlegen. Nachdem kurz nach dem Urknall das gesamte Universum sich explosionsartig aufblähte (die »kosmische Inflation«), war seine Materie sehr gleichmäßig verteilt, und das war im Gegensatz zu dem, was man in der Thermodynamik zu denken gewohnt ist, ein Zustand sehr niedriger Entropie. Unter der Wirkung der Gravitation ist der heutige Zustand des Universums mit voneinander getrennten Materieklumpen weit wahrscheinlicher und damit entropiereicher als ein homogener Feinstaub.

Das ist ein durchgehendes Merkmal des Buchs: Es ist so dick, weil es sich Zeit lässt. Dank epischer Breite kann Greene Dinge plausibel machen, die in anderen populären Darstellungen stets dunkel bleiben (wie der Redakteur, der eine weit engere Seitenzahlbegrenzung einzuhalten hat, neidvoll zugestehen muss).

Das wird besonders deutlich in der Stringtheorie und ihrer Fortsetzung, der *M*-Theorie, nach der alle Elementarteilchen Schwingungszustände noch elementarerer Objekte sind: elastisch und fadenförmig *(strings)* oder trommelfellartig *(membranes)* oder *p*-dimensionale Verallgemeinerungen von trommelfellartig *(p-branes)*, und das Ganze in zehn- bis elfdimensionalen Raumzeiten, von denen alle bis auf die vier vertrauten Dimensionen zu sehr kleinen Kreisen oder Schlimmerem aufgewickelt sind. Hier, in seinem eigenen Arbeitsgebiet, bietet Greene ein wahres Feuerwerk an Analogien auf. Wie weit jede einzelne trägt, wissen die Physiker wahrscheinlich selbst nicht so genau, denn das Gebiet ist noch sehr im Fluss.

Am Ende erzählt Greene, was die gänzlich entfesselte Fantasie seiner Fachkollegen sonst noch hervorgebracht hat: Wurmlöcher, Zeitreisen mit und ohne Großvaterparadox, verschiedene Vielwelttheorien und die Vorstellung, alles Geschehen in unserer Welt sei eine Art Abbild von etwas Zweidimensionalem (das »holografische Universum«). Vielleicht ist ja auch der ganze Raum von einem ungeheuer zappeligen Gewürm aus ungeheuer kleinen Strings angefüllt und damit unvermeidlich ein absoluter Raum – was nebenher die Frage mit Newtons Eimer erledigen würde.

Der Text ist konsequent formelfrei gehalten. Nur in den Anmerkungen, von denen manche zu eigenen kleinen Abhandlungen angewachsen sind, finden sich Formeln – und helfen auch nicht, weil sie zu viel voraussetzen. Den Bildern sieht man an, dass sie eigentlich farbig und weniger mickrig sein sollten.

Ein grandioses Buch. Aber nehmen Sie sich Zeit!

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

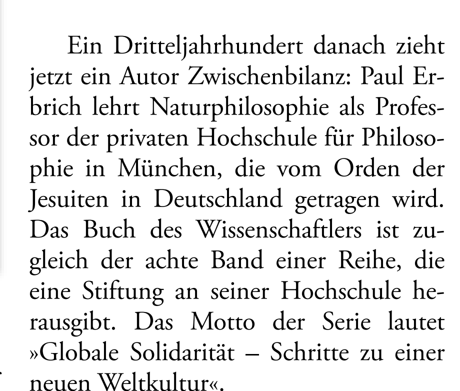
WELTWIRTSCHAFT

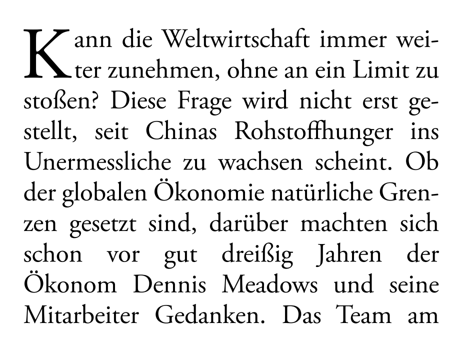
Paul Erbrich

Grenzen des Wachstums im Widerstreit der Meinungen

Leitlinien für eine nachhaltige ökologische, soziale und ökonomische Entwicklung

Kohlhammer, Stuttgart 2004. 272 Seiten, € 35,–





Kann die Weltwirtschaft immer weiter zunehmen, ohne an ein Limit zu stoßen? Diese Frage wird nicht erst gestellt, seit Chinas Rohstoffhunger ins Unermessliche zu wachsen scheint. Ob der globalen Ökonomie natürliche Grenzen gesetzt sind, darüber machten sich schon vor gut dreißig Jahren der Ökonom Dennis Meadows und seine Mitarbeiter Gedanken. Das Team am Massachusetts Institute of Technology erarbeitete 1972 mit Hilfe eines Computermodells einen Bericht für den Club of Rome, der Furore machte. »Die Grenzen des Wachstums« hieß das schmale Buch. Dessen These war: Die zur Neige gehenden Ressourcen und eine sich explosionsartig vermehrende Weltbevölkerung müssen Mitte des 21. Jahrhunderts zu einem gigantischen Desaster führen.

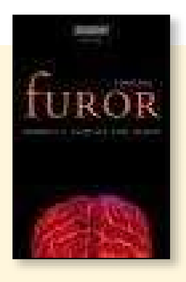
Ein Dritteljahrhundert danach zieht jetzt ein Autor Zwischenbilanz: Paul Erbrich lehrt Naturphilosophie als Professor der privaten Hochschule für Philosophie in München, die vom Orden der Jesuiten in Deutschland getragen wird. Das Buch des Wissenschaftlers ist zugleich der achte Band einer Reihe, die eine Stiftung an seiner Hochschule herausgibt. Das Motto der Serie lautet »Globale Solidarität – Schritte zu einer neuen Weltkultur«.

In diesem Sinn versucht Erbrich, die Argumente von Meadows und seinen Kollegen noch einmal nachzuprüfen, zu erklären, was sich anders entwickelt hat, und darüber zu spekulieren, wie die Zukunft aussehen könnte und welche Optionen der Menschheit offen stehen. Fürwahr ein titanisches Thema, und so nimmt es auch nicht wunder, dass der Autor nach eigenem Bekunden seit den 1970er Jahren über seinem Werk gebrütet hat.

Der Bericht geht von zwei Szenarien jener Zeit aus: Anders als die Computerstudie von Meadows, die ungebremstes Wirtschaftswachstum annahm, setzte das weniger bekannte »Bariloche«-Modell auf eine politische Utopie: Die lateinamerikanischen Forscher, die bereits Mitte der 1970er Jahre mit Mitteln der Fundación Bariloche ein Gegenmodell zu den »Grenzen des Wachstums« aufstellten, hofften, die Kluft zwischen armen und reichen Ländern könnte verringert werden. Indem der Autor an die beiden gegensätzlichen Prognosen anknüpft, spannt er einen Bogen über die entscheidenden Themen Bevölkerungswachstum, Ernährung, Rohstoffe, Energie und Klima. Schließlich wagt er den Versuch, wiederum einen Blick in die Zukunft zu werfen.

Die Frucht von Erbrichs jahrzehntelangen Bemühungen ist ein wohldurchdachtes, ausführliches Buch, dem man die Redlichkeit des Autors jederzeit anmerkt. Die zahlreichen Diagramme sind sehr informativ und gut belegt, wenn auch – da schwarz-weiß – keine Augenweide. Um den Leser nicht gleich mit allzu vielen Details und Zahlen zu überschütten, hat Erbrich durch kleinere Schriftgröße die Beispiele und Einzelheiten markiert, die zum Verständnis des Großen und Ganzen nicht unbedingt notwendig sind.

Für den Autor charakteristisch ist, dass er von sehr grundsätzlichen Fragen



THRILLER

Markus C. Schulte von Drach

Furor

Mit einem Nachwort von Christof Koch.
Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2005. 360 Seiten, € 14,50

Die Idee hinter dem Roman ist richtig schön gruselig. Erstens ist eine Droge erfunden worden, die ihren Konsumenten zu einer willenlosen Mordmaschine macht. Zweitens kann man Erinnerungen eines Menschen nach dessen Tod mit Elektroden aus seinem Gehirn abgreifen, auf CD brennen und über einen Datenhelm im Kopf eines beliebigen Menschen wieder abspielen.

Weiter geht es nach klassischem Muster: Der faustische Wissenschaftler, der an beiden Entdeckungen beteiligt war, wird für sein Schweigen darüber mit einem wundervollen Forschungsinstitut belohnt, entdeckt Jahrzehnte später, dass die finsteren Geheimdienste der Welt ihm seine neuesten Ergebnisse entreißen wollen, was die schlimmsten Folgen für die Menschheit hätte, und beschließt daraufhin, seine Geheimnisse mit ins Grab zu nehmen. Das wiederum erfordert, eben wegen seiner Entdeckung, ungewöhnliche Maßnahmen: Er fährt mit dem Institutsfahrstuhl ins oberste Stockwerk, kriecht unterwegs aufs Kabinendach und lässt sich dort den Schädel zerquetschen.

Der Roman schildert, wie der Sohn des Forschers allmählich hinter das Geheimnis seines Vaters kommt. Ein guter Plot. Aber die Durchführung! Die finsteren Mächte, die dem Helden die ganze Zeit auf den Fersen sind, meucheln zwar ohne Zögern unschuldige Pförtner und andere Mitwisser, verhalten sich aber ansonsten hoffnungslos dämlich. Der Sohn darf unbeaufsichtigt stundenlang am Computer seines soeben verstorbenen Vaters herumspielen, die »Mordmaschinen« geben ihre Taten wahrheitsgemäß und ratlos vor einem Bundestagsausschuss zu Protokoll. Der Show-down mit Schießerei und vielen Heißwasserstrahlen im Heizungskeller des Instituts ist eine schwache Kopie von James Bond.

Die wunderschöne Enthüllungsjournalistin entflammt auf der Stelle und auf Gegenseitigkeit für das Objekt ihrer Recherche; welch herzerwärmende Verknüpfung von Dienstlichem und Privatem! Schade, dass das so hoffnungslos realitätsfremd ist.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

zum Konkreten vorstößt. »Wie kam es so weit?«, fragt er ganz zu Beginn und erläutert erst einmal die Neolithische Revolution. »Was ist Energie?« heißt die Einleitung eines späteren Kapitels. Dass Erbrich bei Adam und Eva anfängt, leistet allerdings dem Leser oftmals gute Dienste. Denn wer wüsste beispielsweise auf Anhieb zu sagen, wo welche Rohstoffe in der Erdkruste zu finden sind? Dazu muss man wissen, wie die Erde überhaupt entstanden und aufgebaut ist, scheint sich der Autor gedacht zu haben, also erläutert er es auch.

Dass manche Abschnitte überfrachtet wirken, war dabei wohl nicht immer zu vermeiden, und man ertappt sich schon einmal beim Diagonallesen. Doch inhaltsreiche und differenzierte Kapitel wie das über Gentechnik oder über die Entstehung und Ausbeutung von Lagerstätten entschädigen für die Längen mancher Passagen und für – seltene – Fehler, etwa bei den Klimafolgen.

Im Allgemeinen überzeugt der Autor auf der naturwissenschaftlichen Seite des Problemkreises mehr als auf der ökonomischen. Doch warum lässt Erbrich das Thema der globalen Wasserkrise fast vollständig aus? Das ist rätselhaft – könnte doch der Wassermangel nach Ansicht mancher Experten bald sogar Kriege auslösen.

Nachdem der Autor alle Tatsachen gegeneinander abgewogen hat, kommt er zu seinem persönlichen Fazit. Demnach sind mineralische Rohstoffe, zum Beispiel Metalle, ein kleineres Problem, als Meadows befürchtet hatte. Es gibt nämlich noch große Ressourcen, und Kupfer etwa lässt sich zur Not recyclen. Vielmehr ist die Kardinalfrage heute: Wie können wir die »krasse Armut überwinden«, den wirtschaftlich schwächsten Ländern gerechterweise eine passable Entwicklung ermöglichen, ohne die Erdölvorräte zu schnell zu plündern, die eigene Wirtschaft abzuwürgen oder das Klima allzu sehr zu schädigen? Auch dieses Buch enthält kein Patentrezept. Doch immerhin: Der Autor hofft, die »globale Bedrängnis« möge gar nicht erst entstehen, wenn wir sie nur – wie vordem Meadows – frühzeitig »antizipieren«. Von dieser Vorahnung legt Erbrich ein detailliertes Zeugnis ab, das nicht an der Oberfläche verweilt.

Sven Titz

Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Werner Härdtle, Jörg Ewald, Norbert Hölzel
Wälder des Tieflandes und der Mittelgebirge
22., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage,
Eugen Ulmer, Stuttgart 2004, 252 Seiten, € 69,90

Das Fachbuch ist übersichtlich gegliedert und gut nachvollziehbar aufgebaut. Gleich mehrere Kapitel befassen sich mit den außeralpinen Waldtypen; dies allerdings immer nur unter standörtlichen, klimatischen und vegetationsökologischen Gesichtspunkten. Naturschutzfachliche Aspekte kommen zum Schluss – aber nicht zu kurz, was den Band gerade für den vorinformierten Praktiker attraktiv machen dürfte.

Ob das Buch allerdings auch seinem Anspruch, dem naturkundlich und landschaftsgeschichtlich interessierten Laien eine stärker wissenschaftlich geprägte Betrachtungsweise zu eröffnen, genügen kann, wage ich zu bezweifeln. Da als Lehr- und Fachbuch konzipiert, lässt der Lesespaß etwas zu wünschen übrig, aber das Buch ist trotz der genannten Kritik empfehlenswert.

Aus der Rezension von Susanne Hufmann

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■
Didaktik	■■■■
Suchen/Finden	■■■■■
Lesespaß	■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	21

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/rezensionen



PHYSIK

Carl Friedrich von Weizsäcker

Der begriffliche Aufbau der theoretischen Physik

Hirzel, Stuttgart 2004. 287 Seiten, € 32,–

Das Buch ist die Ausarbeitung einer Vorlesung, die der theoretische Physiker und Philosoph Carl Friedrich von Weizsäcker 1948 in Göttingen gehalten hat. Es kam ihm »vor allem darauf an, diejenigen Begriffe und Sachverhalte herauszupräparieren, welche die ganze Physik beherrschen, diejenigen Fragen, welche die gesamte Forschung in Spannung halten«. Nach fast 60 Jahren ist der Text ein historisches Dokument und wird uns auch so, als Vorlesung, präsentiert: keine Literaturangaben, kein Glossar und eine Fülle von Formulierungen, die mündlich vorgetragen akzeptabel sein mögen, schriftlich aber schlicht peinlich sind.

Ein Buch ist nun einmal ein Buch und keine Vorlesung, die auch durch Intonation der Verständlichkeit aufhelfen kann. Der Satz »Das Ding ist in vielen Weisen des Erscheinens ein und dasselbe« klingt zwar tiefsinnig; aber er ist ein Beispiel für Richard P. Feynmans abfällige Bemerkung, dass Philosophen Aufhebens davon machen, dass »eine Person von vorn anders aussieht als von hinten«. Auch zahlreiche Ungenauigkeiten stören mich. Ein Beispiel: Bereits vermöge des Satzes vom ausgeschlossenen Dritten formuliert von Weizsäcker als die Verneinung des Gravitationsgesetzes »Zwei Massen ziehen sich stets an« die Aussage »Sie können sich nicht anziehen« – während doch die Logik höchstens ergibt, dass sie sich mindestens einmal nicht angezogen haben oder anziehen werden.

Aber abgesehen von diesen – sehr zahlreichen – Kleinigkeiten: Verdient dieses Buch über den historischen Aspekt hinaus Interesse? Meine Antwort ist ein zögerliches Ja. Zwar ist zumindest in meinem Arbeitsgebiet, der Physik der Elementarteilchen, zu dem, was Weizsäcker 1948 kennen konnte, vieles hinzugekommen. Gleichwohl sind einige Fragen von damals, »welche die gesamte Forschung in Spannung halten«, bis heute nicht beantwortet. Über die schwache Wechselwirkung wissen wir heute mehr, als Weizsäcker sich träumen lassen konnte; neue Fragen nach lokaler Symmetrie, nach dem Ursprung der Masse und manchem anderen sind aufgetaucht. Aber es bleiben doch die alten Fragen, die sich in dem Schlagwort »Quantenmechanik« zusammenfassen lassen.

Hier vertritt Weizsäcker die auch heute noch aktuelle »Kopenhagener Interpretation«. Kennt man sie, weiß man die Fortschritte seit damals zu würdigen. Was Weizsäcker zu den bereits 1948 klassischen Themen Raum, Zeit und Zufall zu sagen wusste, ist heute so lesenswert wie damals. Heute ist keine Wissenschaftstheorie ohne Popper, keine Diskussion der Grundlagen der Mathematik ohne Turing mehr möglich. Wer liest, was Weizsäcker – ohne Popper und ohne Turing – zu diesen Themen zu sagen hatte, kann dadurch sein Verständnis der weiteren Entwicklung schärfen.

Insgesamt habe ich das Buch vor allem, aber nicht nur, als historisches Dokument gelesen.

Henning Genz

Der Rezensent ist emeritierter Professor für theoretische Physik an der Universität Karlsruhe. Sein Arbeitsgebiet ist die Theorie der Elementarteilchen.



WISSENSCHAFT ALLGEMEIN

Ralph Caspers

Wissen macht Ah!

Klugscheißen mit Shary und Ralph

Ullstein, Berlin 2004. 224 Seiten, € 14,95

Wir haben zu Hause keinen Fernseher. Deswegen wusste ich auch nicht, dass »Wissen macht Ah!« eigentlich eine Fernsehsendung für Jugendliche zum Thema »Wissen« ist (samstags um 8 Uhr in der ARD, montags bis donnerstags um 19.25 Uhr im Kinderkanal).

Wie in der Fernsehsendung treten der bleiche Ralph mit der eckigen Brille und die schwarze Shary mit dem Augenbrauenpiercing auf und erzählen allerlei Wissenswertes. Dabei gibt es immer wieder zwischendurch ein paar leicht unappetitliche Nebenbemerkungen: »Ohren-

»Kirschsirup plus rote Grütze gibt eins a Herzblut«, das in den Kuchen in Herzform gefüllt wird. »Mmh, blutendes Herz. Das freut den Vati.«



Alle rezensierten Bücher können Sie bei wissenschaft-online bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

schmalz ist ein bisschen eklig. Denn im Gegensatz zu Popeln ist Schmalz ungenießbar.« Vielleicht soll das die Erwachsenen verschrecken, damit die Kinder unter sich sind.

Das Buch ist unterhaltsam und gut verständlich geschrieben. Vieles war mir nicht mehr fremd, zum Beispiel dass der Zahn das Härteste in unserem Körper ist und Cola den Schmelz anätzt.

Zu jedem Buchstaben des Alphabets gibt es ein Kapitel, das mit diesem Buchstaben beginnt. Das ist manchmal etwas gewaltsam, wenn zum Beispiel die Kekse unter »Igitt – Kackes« kommen. Na ja, die Schreibweise »Keks« wurde eingeführt, damit man das englische »Cakes« nicht so ausspricht, wie es geschrieben wird. Und für das Vorwort muss man halt bis V warten.

Manchmal ist es etwas schwer zu lesen, zum Beispiel das Experiment auf S. 67, das eigentlich ganz lustig ist: Man macht Krater, indem man kleine Bällchen aus Kartoffelbrei in eine Schüssel mit Kartoffelbrei schleudert. Aber die Schrift wechselt so stark die Größe, dass die erste Zeile nur aus einem einzigen Wort besteht, während die letzte Zeile 15 Worte hat.

Oder der Text steht plötzlich kopfüber auf der Seite oder ist kaum zu lesen, weil er kontrastarm rosa auf rosa gedruckt ist. Solche Teile hätte ich am liebsten übersprungen.

Die Witze in dem Buch fand ich nicht sehr lustig (Nachtreten ist böse, Nachschlagen gut – haha!) und manche Bemerkungen einfach nur dumm: Klar muss ich vorher um Erlaubnis fragen, wenn ich die Küche in ein Chaos verwandeln will. Aber das müssen mir Ralph und Shary nicht extra erzählen (und noch ein feierliches Erlaubnisformular dazu abdrucken).

Schön abwechslungsreich sind die kleinen Geschichten am unteren Seitenrand: »Das lauteste Schnarchen eines Menschen erreichte 93 Dezibel«, steht bei der Seitenzahl 93.

Esther Klingenberg

Die Rezensentin geht in die 9. Klasse der Heidelberger Waldorfschule.

Energieverhältnisse

Was außer technischen Problemen hindert uns eigentlich daran, ein Stück Würfelzucker »ganz in Energie umzuwandeln«, wie man es so oft und so falsch lesen kann?

Von Norbert Treitz

> Ändert sich die Energie um L, so ändert sich die Masse in demselben Sinne um $L/9 \cdot 10^{20}$, wenn die Energie in Erg und die Masse in Grammen gemessen wird.

So steht es kurz vor dem Ende der Arbeit »Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?«, die Albert Einstein im September 1905 an die »Annalen der Physik« sandte.

Wenn sich zwei Messgrößen stets im gleichen Sinn mit einem festen Umrechnungsfaktor ändern, können sie sich ansonsten nur um eine additive Konstante unterscheiden. Im Rahmen der klassischen Mechanik, unserer vertrauten und für langsame Objekte sehr gut brauchbaren Näherung an die relativistische Mechanik, haben wir eine klare Vorstellung davon, was eine Masse 0 zu bedeuten hat, schieben aber den Nullpunkt der Energie je nach Bequemlichkeit mal in unendliche Entfernungen und mal auf die Höhe des Labortisches. Es ist daher kein Problem, der Energie den gleichen Nullpunkt zu geben wie der Masse. Genau dann hat man die Äquivalenzformel $E=mc^2$, in der sich die Masse von der Energie nur noch in der Maßeinheit unterscheidet.

Besonders wichtig sind in dem obigen Zitat die Worte »in demselben Sinne«. Wenn es sich um eine Umwandlung zwischen Masse und Energie handelte, wie man viel zu oft zu lesen bekommt, müsste es »im ungekehrten Sinne« heißen. Zu einer solchen Missdeutung kommt es durch unsachgemäße Bilanzierung: Man sieht die Masse, die bei A weniger wird, und die Energie, die bei B mehr wird. Das ist aber keine Umwandlung, sondern eine Wanderung ein und derselben Bilanzgröße von A nach B, die man Masse oder Energie nennen kann.

In jedem einzelnen Bezugssystem erweist sich die Energie E als Summe aus einer Ruheenergie E_0 und einer Bewegungsenergie E_k. Dabei ist also der Quotient E_k/E eine Zahl zwischen 0 und 1, und er hängt mit der Geschwindigkeit v so zusammen: $E_k/E=1-\sqrt{1-v^2/c^2}$. Wenn v klein gegen die Vakuumlichtgeschwindigkeit c ist, ist das einfach $v^2/(2c^2)$, für $v=c$ ist es dagegen 1. Das bedeutet: Was sich mit c bewegt, hat keine Ruhe-, sondern nur Bewegungsenergie, und seine Masse ist $E/c^2=E_k/c^2$. Im Kasten rechts ist E_k/E auf einer logarithmischen Skala aufgetragen. Die Gestalt der Geschwindigkeitsskala am rechten Rand lässt die beiden genannten Näherungen erkennen: doppelt so breit gespreizt wie die (E_k/E)-Skala für kleine v und noch gespreizter in der Nähe von c.

Leider wird das Wort »Masse« oft im Sinn von »Ruhemasse« benutzt, und es wird dann vom Photon als einem »masselosen Teilchen« gesprochen. Wenn das wörtlich gemeint wäre, stände es im Widerspruch zur Äquivalenzformel.

Schwerepotenziale

Nachdem ein Raumschiff seine Bewegungsenergie vom Start »aufgebraucht« hat, steckt diese im Schwerefeld; es ist aber üblich und häufig auch sinnvoll, sie als »potenzielle Energie« dem Raumschiff zuzuordnen. Wenn ein Objekt der Masse m in einem Schwerefeld gehoben oder abgesenkt wird, ist die dabei in das Feld zu steckende (beziehungsweise aus ihm entnehmbare) Energie zu m proportional. Den Quotienten aus Energie und Masse kann man als Schwerepotenzial-Differenz bezeichnen und verschiedenen Höhen über einer Planetenoberfläche – unter geeigneter Wahl eines Nullpunkts – solche Potenziale zuschreiben, die selbst nicht von der Masse der verlagerten Objekte (Bergsteiger oder Mondraketen) abhängen. Die Maßeinheit des Schwerepotenzials ist Joule/Kilogramm. Aber nun sind Masse und Energie bis auf den Umrechnungsfaktor c^2 dasselbe: Das Schwerepotenzial ist in Wirklichkeit eine dimensionslose Größe. Im homogenen Feld nahe der Erdoberfläche (also in der Näherung für sehr kleine Bruchteile des Erdradius) entspricht es einfach dem Produkt aus der Höhe und der Fallbeschleunigung (= Schwerefeldstärke) g.

Ein Stabhochspringer wandelt Bewegungsenergie in solche Höhenenergie um: Er nimmt Anlauf, speichert seine Bewegungsenergie vorübergehend in der elastischen Verbiegung des Stabs und steckt sie bei dessen Entspannung in das Schwerefeld. Bei 10 Meter pro Sekunde Anlaufgeschwindigkeit kommt er so 5 Meter hoch, wegen der Armarbeit und der gratis hinzugerechneten Beinlänge sogar etwas höher.

Der Vergleich zwischen Höhen- und Bewegungsenergie kann auch zur Verkehrserziehung dienen. Die Geschwindigkeit eines schnellen Autos entspricht der eines Objekts, das um die Höhe des Kölner Doms herabfällt – mit vergleichbaren Folgen, wenn die Geschwindigkeit plötzlich auf null reduziert wird.

Mit dem elektrischen Feld verhält es sich wie mit dem Schwerefeld: Wird ein elektrisch geladenes Objekt in einem elektrischen Feld verlagert, so ist die Entnahme aus dem Feld oder Einspeisung in dieses proportional zu seiner Ladung, sodass es sinnvoll ist, den Quotienten aus Energiedifferenz und Ladung zu bilden; das ist die elektrische Spannung. In der Elektrostatik und beim Gleichstrom (also im stationären Feld) ist die Spannung nur von den Endpunkten des Weges abhängig, sodass man den Punkten Potenziale zuschreiben kann, die bei Wahl eines Nullpunkts eindeutig sind.

Umwandlungs-Ausbeuten

Ein Photon trifft ein Atom und versetzt es dadurch in einen angeregten Zustand. Wo geht die Energie des Photons hin? Hauptsächlich ins elektrische Feld der Atomhülle. Das Elektron »springt auf eine höhere Umlaufbahn« und wird dadurch langsamer, steckt also noch eigene Bewegungsenergie ins elektrische Feld. Diese Bilanz bleibt gültig, obgleich wegen der quantenmechanischen Unbestimmtheit von Umlaufbahnen nicht die Rede sein kann.

Im Wasserstoffatom hat das Elektron im Ruhezustand die Bewegungsenergie

13,6 eV entsprechend der Geschwindigkeit $c/137$. (Die Energieeinheit eV ist das Produkt aus einem Volt und der Elementarladung e_0, die bis aufs Vorzeichen gleich der Ladung des Elektrons ist; daher die leicht irreführende Bezeichnung »Elektronenvolt«.) Um das Elektron vollständig aus seiner Bindung an den Atomrumpf zu lösen (also das Atom zu ionisieren), sind noch einmal 13,6 eV erforderlich. Soll man die 27,2 eV, die jetzt in dem – nun sehr ausgedehnten – elektrischen Feld zwischen Kern und Elektron stecken, als potenzielle Energie dem Elektron zuordnen? Das wäre wenig sinnvoll, denn das Elektron wird kaum zu »seinem« Kern zurückfinden. Was hier ionisiert oder – bei kleineren Energieaufnahmen – angeregt wird, ist das Atom. Auf dessen Masse (beziehungsweise Energie) beziehen wir daher die Energieänderung.

Wo hat die Energie, die bei einer Verbrennung frei wird, vorher gesteckt? Im Brennstoff, sagt der geplagte Kunde der Tankstelle, weil er diesen im Gegensatz zum Sauerstoff bezahlen muss. Als Bewohner einer reduzierenden (Ur-)Atmosphäre – mit sehr viel Methan – kämen wir vermutlich aber zu einer anderen, ebenso einseitigen Darstellung. Wer als Astronaut beides mitnehmen muss, sieht die Dinge zwangsläufig richtiger.

Feuer – ein lumpiges Milliardstel

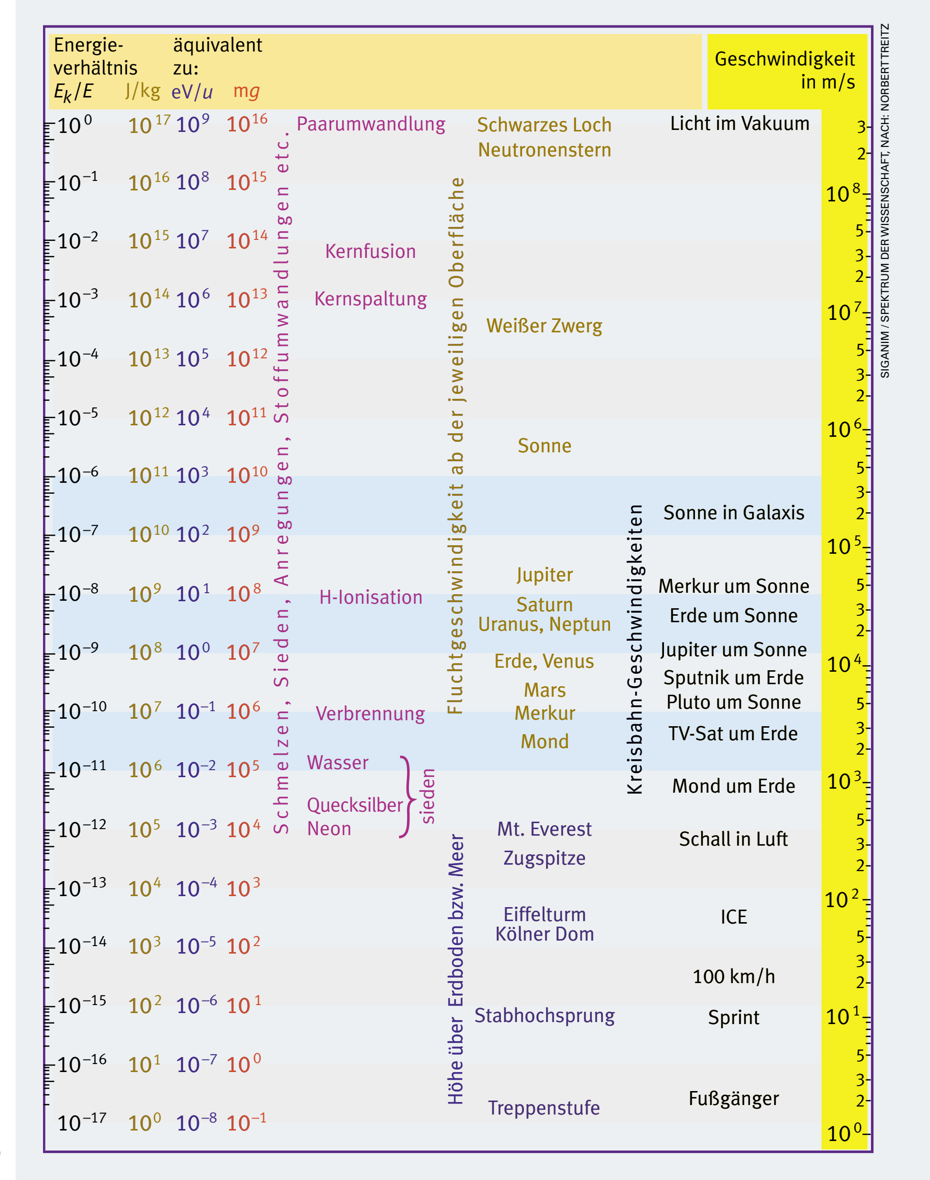
Nehmen wir ein Kilogramm Öl und lassen es katalytisch oder bei geeigneter Zündtemperatur mit Sauerstoff reagieren. Als physikalisch denkende Menschen sehen wir von dem Unterschied zwischen beiden chemischen Reaktionen ebenso ab wie von dem Unterschied zwischen Salat- und Dieselöl – solange wir das Öl nicht essen müssen. Bei der Reaktion entstehen Wasser und Kohlenstoffdioxid; pro Kilogramm Öl werden rund 40 Megajoule an Energie frei, die wir zum Heizen oder zur Fortbewegung nutzen können. Bei der umgekehrten Stoffumwandlung (Photosynthese) wird das Gemisch aus Wasser und Kohlenstoffdioxid mit Sonnenenergie wieder »angeregt«.

Wenn man die 40 Megajoule durch die Masse von Öl und Sauerstoff teilt und mit $E = mc^2$ weiterrechnet, findet man, dass die Chemie reichhaltiger Brennstoffgemische eine Wissenschaft von der zehnten Dezimalstelle ist (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 114). Andere chemische Reaktionen oder die Verdampfung liegen in Bereichen noch weiter hinter dem Komma.

Ergiebiger sind da schon die Stoffumwandlungen aus der Kernphysik. Bei der Spaltung ist die Energieausbeute 10^{-3}, nämlich rund 200 MeV (Megaelektronenvolt) freigesetzter Energie pro Atomkern mit einer Masse äquivalent zu etwa 200 GeV (Gigaelektronenvolt). Die Energie wird dem elektrischen Feld im Atomkern entnommen, das zusätzlich noch eine Vergrößerung der Oberflächenenergie der Kerne bezahlen muss. Bei der Kernfusion von Wasserstoff zu Helium ▷

Welchen Anteil hat die kinetische Energie?

Das Verhältnis E_k/E von kinetischer zu Gesamtenergie ist hier auf einer logarithmischen Skala aufgetragen: vom maximal möglichen Wert 1 (oben) bis zum Fußgänger als Maß aller Dinge bei 10^{-17} (unten). Die zugehörigen Geschwindigkeiten (rechts) sind mit Beispielen untermalt. Die Fluchtgeschwindigkeit ist die Startgeschwindigkeit, die gerade ausreichen würde, das jeweilige astronomische Objekt von seiner Oberfläche aus unendlich weit zu verlassen, wenn es sonst keine Sterne oder andere Massen gäbe. Dabei wird die ganze Start-Bewegungsenergie in das Schwerefeld eingespeist, und für die eigene Bewegung bleibt nichts übrig; man kommt also ziemlich langsam im Unendlichen an. Für die Erde beträgt die Fluchtgeschwindigkeit 11,2 Kilometer pro Sekunde; beim Start nach Osten bekommt man einen gewissen Teil von der Erdrotation geschenkt, besonders wenn man so nahe am Äquator ist wie in Kourou.



▷ wird dagegen ein elektrisches Feld zwischen den Protonen eingerichtet; dieses wird ebenso wie die Ausbeute von etwa 7 MeV/GeV = $0{,}7 \cdot 10^{-2}$ an Strahlungs- und Bewegungsenergie aus der Verkleinerung der Oberflächenenergie (starke Wechselwirkung, Farbkraft) finanziert. Die sieben Zehnerpotenzen zwischen Kernspaltung und Verbrennung sind die gleichen wie zwischen den wenigen Kilogramm Plutonium in der Kernspaltungsbombe und den mehreren Kilotonnen Trinitrotoluol in einer konventionellen Bombe gleicher Zerstörungsfähigkeit.

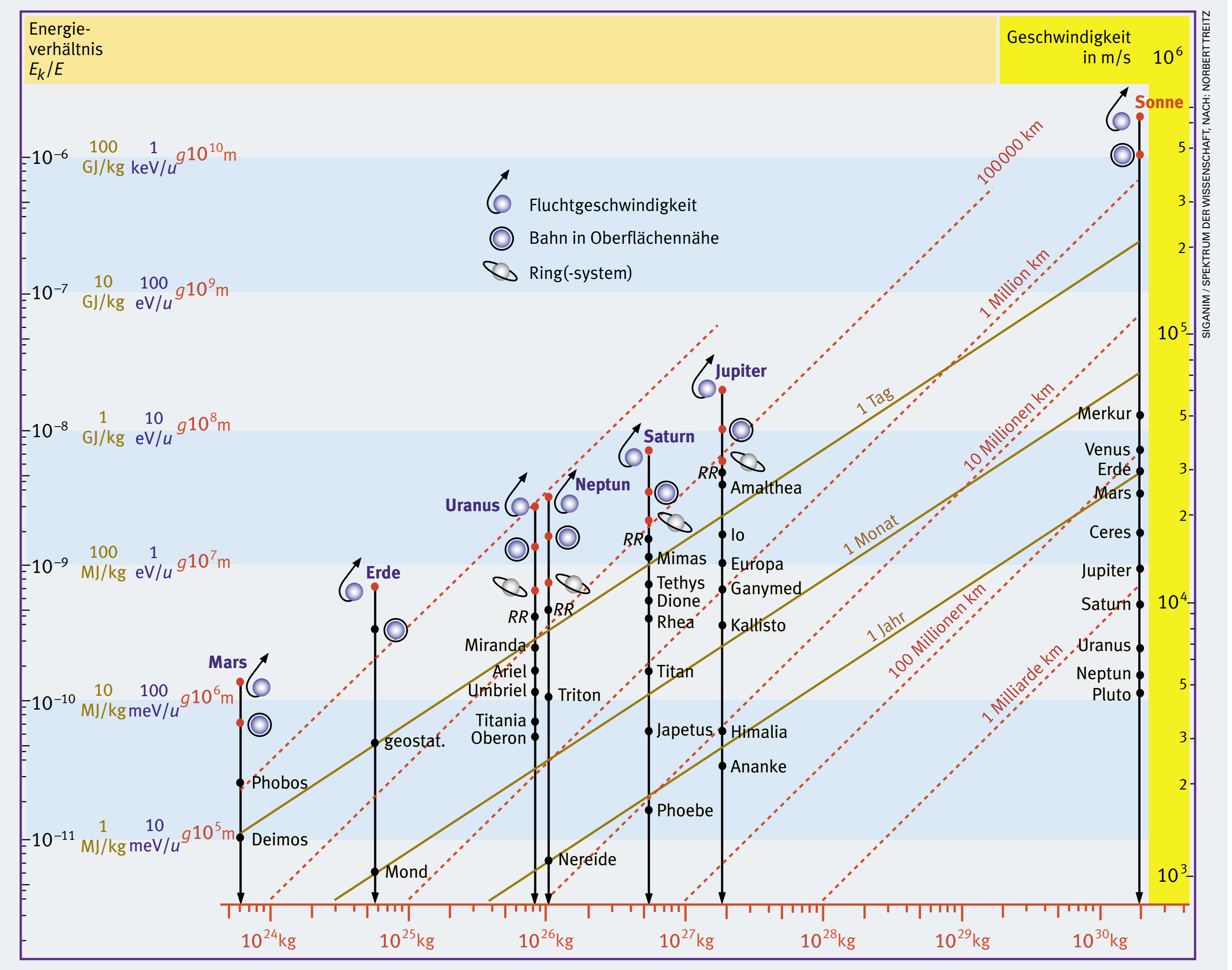
Bei der Paarumwandlung aus gleichen Teilen Materie und Antimaterie kann man die entstehenden Photonen als Ausbeute ansehen, die dann 100 Prozent beträgt. Ein Elektron-Positron-Paar »bringt« gut 1 MeV, ein Proton-Antiproton-Paar das rund 1800fache: knapp 2 GeV. Es wird gerade in diesem Jahr 1905+100 oft diskutiert, wie viel Energie man aus einem Stück Zucker bekäme, wenn man es nicht nur verbrennen, sondern »ganz in Strahlung umwandeln« könnte. Dazu bräuchte man einen Reaktionspartner, nämlich Antimaterie von gleich großer Masse, und zwar nicht, weil uns wegen technischer Rückständig-

Energieverhältnisse im Sonnensystem

Dieser Ausschnitt aus der vorigen Grafik ist erweitert um eine waagerechte Skala, in der die jeweiligen »Zentralmassen« logarithmisch aufgetragen sind.

Zu einem Stern, einem Planeten oder sonst einer isotropen Kugel mit der Masse M und dem Radius R gibt es nicht nur eine Fluchtgeschwindigkeit, sondern auch eine Geschwindigkeit für eine oberflächennahe Kreisbahn; für die Erde sind das 7,9 Kilometer pro Sekunde. Ein Objekt der Masse m, das den Zentralkörper auf einer Kreisbahn vom Radius r umläuft, hat die Bahngeschwindigkeit $v = \sqrt{(M+m)G/(2r)}$ oder $v = \sqrt{MG/(2r)}$, wenn m vernachlässigbar klein gegen die Masse M des Zentralkörpers ist; G ist die Gravitationskonstante. Im Bild finden sich die Namen von Satelliten und Planeten bei ihren Geschwindigkeiten eingetragen; Ellipsenbahnen sind durch Kreisbahnen mit jeweils gleich großen Durchmessern ersetzt. Gleiche Bahnradien liegen auf Geraden der Steigung 1, gleiche Umlaufzeiten auf solchen der Steigung 2/3.

Das Symbol RR kennzeichnet den Roche-Radius: Innerhalb dieser Grenze überwiegt die Inhomogenität des Schwerefelds die gegenseitige Anziehung benachbarter Staubteilchen, die sich deswegen nicht zu Monden verklumpen, sondern zu Ringen zerbröseln (Spektrum der Wissenschaft 7/2005, S. 106). Lücken in den Ringsystemen beruhen auf niedrig-rationalen Verhältnissen der zugehörigen Umlaufzeiten zu denen von schweren Satelliten: Steinchen auf solchen Radien werden periodisch gestört und wandern sozusagen aus. In ähnlicher Weise sorgen unsere größten Planeten für unbesetzte Bahnradien im Kleinplanetengürtel der Sonne.



keit nichts Besseres einfiele, sondern weil für die Baryonen- und die Leptonenzahl Erhaltungssätze gelten. Falls Ihnen aber jemand ein Stück Antizucker zu geben droht, sollten Sie rechtzeitig das Weite suchen.

Einige Querbeziehungen

Die eigentliche Botschaft der beiden Diagramme auf diesen Seiten liegt nicht in den einzelnen Daten und auch nicht so sehr im Vergleich gleichartiger Daten, sondern in den Querbeziehungen, die man erst nach dem Umrechnen auf die gemeinsame Energieverhältnisskala sieht. So kann man astronautische massenbezogene Bewegungsenergien nicht nur in Joule pro Kilogramm, sondern auch in eV/*u* (*u* ist die atomare Masseneinheit, knapp die Masse des Wasserstoffatoms) oder auch dimensionslos angeben. Oder man vergleicht sie mit einem hypothetischen homogenen Schwerefeld, das überall in der Welt so stark wäre wie unser gewohntes über dem Erdboden.

Man sieht sogleich, dass man mit chemischen Brennstoffen im Sonnensystem nicht sehr weit kommt, wenn das (Miss-)Verhältnis aus Brennstoff und Nutzlast nicht zu gewaltig werden soll. Wenn man es geschickt anstellt, kommen einem aber Planeten sehr buchstäblich entgegen. Deren Bewegungsenergie kann man mit Swing-by-Manövern anzapfen und sich so im Potenzialtopf der Sonne bis nach außen hangeln (Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 101).

Man sieht auch, wie viel Energie die Erde durch ihre Bewegung um die Sonne hat: fast 5 Milliardstel ihrer Gesamtenergie und damit 15-mal so viel, wie man durch ihre Komplettverbrennung gewinnen könnte, wenn sie aus nichts als Kohle und Sauerstoff bestünde. ◁



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

AUTOR UND LITERATURHINWEIS

Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? Von Albert Einstein in: Annalen der Physik, Bd. 18, S. 639, 1905

PREISRÄTSEL

Reine Zeitfrage

Von Thomas Rubitzko

Es war eine klare Februarnacht in Paris. Ihre Liebe war noch frisch. Sie hatten sich eine Woche zuvor am Rosenmontag in Köln kennen gelernt. In eine Decke gehüllt saßen sie auf einer Bank, nur wenige Schritte entfernt von Sacré-Coeur. Der Halbmond, der direkt vom Eiffelturm herüberschien, warf ein fahles Licht auf ihre Gesichter. Sie schaute ihn erwartungsvoll an und stellte die schicksalhafte Frage: »Du, Horst, sag mal, weißt du ungefähr, wie viel Uhr es ist?«

Wissen Sie es?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Standfiguren »Einstein«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. September 2005, eingehen.

Lösung zu »Stimmt!« (Juli 2005)

FÜNF	1521	1821	1921	3563	4584	4784
+ FÜNF	+ 1521	+ 1821	+ 1921	+ 3563	+ 4584	+ 4784
ZEHN	3042	3642	3842	7126	9168	9568

Diese sechs Lösungen des Kryptogramms sind die einzigen, wie Gerhard Düsing aus Eppstein zeigte.

Um das Probieren in Grenzen zu halten, denkt man am besten zuerst über *F* und *Ü* nach. Welche Werte kann *F* annehmen? Unter der Einer- und der Tausenderspalte stehen die unterschiedlichen Werte *N* und *Z*. Da in der Einerspalte kein Übertrag hinzukam, ist $N=2\cdot F$ und $Z=2\cdot F+1=N+1$. Zudem muss $N<10$ sein und damit $F<5$. Außerdem ist $F\neq0$, sonst würde in der Einerspalte auch unter dem Summenstrich ein *F* stehen. Damit bleiben für *F* nur die vier Werte 1, 2, 3 und 4.

Für *Ü* kommen nur die Werte 5, 6, 7, 8 oder 9 in Frage; denn da aus der Hunderterspalte eine Eins in die Tausenderspalte übertragen wurde, muss $Ü\geq5$ sein.

Legt man *F* und *Ü* fest, so lassen sich die beiden restlichen Werte wie folgt berechnen:

$H=(2\cdot N)$ mod 10 und

$E=2\cdot Ü-10$, wenn $F=1$ oder $F=2$ ist (dann ist nämlich $N<5$); $E=2\cdot Ü-9$ für $F=3$ oder $F=4$ (dann ist $N>5$). Insgesamt kommen damit $4\cdot5=20$ Kombinationen in Frage (siehe unten). Die sechs rot markierten sind die einzigen, für die wirklich jeder Buchstabe eine andere Ziffer verschlüsselt.

F	Ü	N	Z	H	E
1	5	2	3	4	0
1	6	2	3	4	2
1	7	2	3	4	4
1	8	2	3	4	6
1	9	2	3	4	8
2	5	4	5	8	0
2	6	4	5	8	2
2	7	4	5	8	4
2	8	4	5	8	6
2	9	4	5	8	8
3	5	6	7	2	1
3	6	6	7	2	3
3	7	6	7	2	5
3	8	6	7	2	7
3	9	6	7	2	9
4	5	8	9	6	1
4	6	8	9	6	3
4	7	8	9	6	5
4	8	8	9	6	7
4	9	8	9	6	9

Die Gewinner der fünf Rucksäcke »Elefant« sind Maximilian Meixlsperger, München; Christian-Otto Schacht, Bremen; Angela Vormbrock, Bielefeld; Sedar Akin, Augsburg; und Eduard Baumann, Le Mouret (Schweiz).

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

keit nichts Besseres einfiele, sondern weil für die Baryonen- und die Leptonenzahl Erhaltungssätze gelten. Falls Ihnen aber jemand ein Stück Antizucker zu geben droht, sollten Sie rechtzeitig das Weite suchen.

Einige Querbeziehungen

Die eigentliche Botschaft der beiden Diagramme auf diesen Seiten liegt nicht in den einzelnen Daten und auch nicht so sehr im Vergleich gleichartiger Daten, sondern in den Querbeziehungen, die man erst nach dem Umrechnen auf die gemeinsame Energieverhältnisskala sieht. So kann man astronautische massenbezogene Bewegungsenergien nicht nur in Joule pro Kilogramm, sondern auch in eV/*u* (*u* ist die atomare Masseneinheit, knapp die Masse des Wasserstoffatoms) oder auch dimensionslos angeben. Oder man vergleicht sie mit einem hypothetischen homogenen Schwerefeld, das überall in der Welt so stark wäre wie unser gewohntes über dem Erdboden.

Man sieht sogleich, dass man mit chemischen Brennstoffen im Sonnensystem nicht sehr weit kommt, wenn das (Miss-)Verhältnis aus Brennstoff und Nutzlast nicht zu gewaltig werden soll. Wenn man es geschickt anstellt, kommen einem aber Planeten sehr buchstäblich entgegen. Deren Bewegungsenergie kann man mit Swing-by-Manövern anzapfen und sich so im Potenzialtopf der Sonne bis nach außen hangeln (Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 101).

Man sieht auch, wie viel Energie die Erde durch ihre Bewegung um die Sonne hat: fast 5 Milliardstel ihrer Gesamtenergie und damit 15-mal so viel, wie man durch ihre Komplettverbrennung gewinnen könnte, wenn sie aus nichts als Kohle und Sauerstoff bestünde. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEIS



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? Von Albert Einstein in: Annalen der Physik, Bd. 18, S. 639, 1905

PREISRÄTSEL

Reine Zeitfrage

Von Thomas Rubitzko

Es war eine klare Februarnacht in Paris. Ihre Liebe war noch frisch. Sie hatten sich eine Woche zuvor am Rosenmontag in Köln kennen gelernt. In eine Decke gehüllt saßen sie auf einer Bank, nur wenige Schritte entfernt von Sacré-Coeur. Der Halbmond, der direkt vom Eiffelturm herüberschien, warf ein fahles Licht auf ihre Gesichter. Sie schaute ihn erwartungsvoll an und stellte die schicksalhafte Frage: »Du, Horst, sag mal, weißt du ungefähr, wie viel Uhr es ist?«

Wissen Sie es?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Standfiguren »Einstein«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. September 2005, eingehen.

Lösung zu »Stimmt!« (Juli 2005)

FÜNF	1521	1821	1921	3563	4584	4784
+ FÜNF	+ 1521	+ 1821	+ 1921	+ 3563	+ 4584	+ 4784
ZEHN	3042	3642	3842	7126	9168	9568

Diese sechs Lösungen des Kryptogramms sind die einzigen, wie Gerhard Düsing aus Eppstein zeigte.

Um das Probieren in Grenzen zu halten, denkt man am besten zuerst über *F* und *Ü* nach. Welche Werte kann *F* annehmen? Unter der Einer- und der Tausenderspalte stehen die unterschiedlichen Werte *N* und *Z*. Da in der Einerspalte kein Übertrag hinzukam, ist $N=2\cdot F$ und $Z=2\cdot F+1=N+1$. Zudem muss $N<10$ sein und damit $F<5$. Außerdem ist $F\neq 0$, sonst würde in der Einerspalte auch unter dem Summenstrich ein *F* stehen. Damit bleiben für *F* nur die vier Werte 1, 2, 3 und 4.

Für *Ü* kommen nur die Werte 5, 6, 7, 8 oder 9 in Frage; denn da aus der Hunderterspalte eine Eins in die Tausenderspalte übertragen wurde, muss $Ü\geq 5$ sein.

Legt man *F* und *Ü* fest, so lassen sich die beiden restlichen Werte wie folgt berechnen:

$H=(2\cdot N) \bmod 10$ und

$E=2\cdot Ü-10$, wenn $F=1$ oder $F=2$ ist (dann ist nämlich $N<5$); $E=2\cdot Ü-9$ für $F=3$ oder $F=4$ (dann ist $N>5$). Insgesamt kommen damit $4\cdot 5=20$ Kombinationen in Frage (siehe unten). Die sechs rot markierten sind die einzigen, für die wirklich jeder Buchstabe eine andere Ziffer verschlüsselt.

F	Ü	N	Z	H	E
1	5	2	3	4	0
1	6	2	3	4	2
1	7	2	3	4	4
1	8	2	3	4	6
1	9	2	3	4	8
2	5	4	5	8	0
2	6	4	5	8	2
2	7	4	5	8	4
2	8	4	5	8	6
2	9	4	5	8	8
3	5	6	7	2	1
3	6	6	7	2	3
3	7	6	7	2	5
3	8	6	7	2	7
3	9	6	7	2	9
4	5	8	9	6	1
4	6	8	9	6	3
4	7	8	9	6	5
4	8	8	9	6	7
4	9	8	9	6	9

Die Gewinner der fünf Rucksäcke »Elefant« sind Maximilian Meixlsperger, München; Christian-Otto Schacht, Bremen; Angela Vormbrock, Bielefeld; Sedar Akin, Augsburg; und Eduard Baumann, Le Mouret (Schweiz).

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Umstrittene Felsgemälde

Berichten Malereien und Zeichnungen an den Felswänden Kaliforniens von einstigen Erdbeben?

Von Susan E. Hough

Meine berufliche Laufbahn kannte lange nur ein Thema: Erdbeben. Aber das lag auch im Wortsinn nahe, denn seit Langem lebe ich in Kalifornien. Dieser Bundesstaat hat nicht nur eine wunderbare Landschaft zu bieten, sondern auch zahlreiche seismisch aktive Gebiete. Kurz gesagt: Kalifornien ist ein gigantisches geologisches Puzzle und ein Outdoor-Erlebnispark gleichermaßen.

Als ich kürzlich einen Führer zu den Myriaden geologischer Verwerfungen des »Sonnenstaats« verfasste, kam mir ein geradezu abenteuerlicher Gedanke. Er wollte partout nicht wieder aus meinem Kopf, tanzte herum und nahm allmählich konkrete Gestalt an. Mir war nämlich aufgefallen, dass an den spektakulärsten Stätten seismischer Aktivität – seien es Erdbeben oder Vulkanausbrüche – auch die schönsten Felsmalereien zu finden sind.

Vergleichbares ist aus den nordwestpazifischen Staaten Washington und Oregon bereits bekannt. Lange bevor Geologen das seismische Potenzial der Region erkannten, besangen Indianer dort Erdbeben und Tsunamis. Ruth Ludwin, eine Seismologin der Universität Washington, hat diese mündlichen Überlieferungen studiert. Sie fand Entsprechungen zu lang vergangenen und weit entfernten geologischen Ereignissen. Dazu gehört ein gewaltiges Beben, das Kenji Satake vom Geologischen Dienst Japans dank historischer Fluttabellen auf 21.00 Uhr am 26. Januar 1700 datieren konnte: Die Erschütterungen hatten einen Tsunami ausgelöst, der mit wenigen Stunden Verspätung den Inselstaat ereichte.

In den Mythen kalifornischer Stämme allerdings spielen Erdbeben keine große Rolle. Das muss einem heutigen Bewohner seltsam vorkommen, ist das letzte Zittern der Oberfläche doch immer für einen Smalltalk gut, und sei es in einem Chatroom im Internet. Am 18. Juli 2002 wurde mein Arbeitstag durch ein vertrautes Vibrieren der Regale und Fensterscheiben unterbrochen. Sofort rief ich die »Haben Sie es auch gespürt?«-Internetseite des Geologischen Dienstes auf und trug meine Beobachtungen in einen Fragebogen ein. Innerhalb weniger Stunden folgten einige hundert andere. Das Beben entpuppte sich als relativ schwach: 2,8 auf der Richterskala.

Diese Webseite ist eine Erfindung meines Kollegen und guten Freunds David Wald, und ihre Akzeptanz übertrifft alle Erwartungen. Nach einem 7,1-Beben 1999 konnten wir 25 000 Augenzeugenberichte auswerten.

Nachrichten im Wüstenlack

Wie reagierten die Menschen auf Erdbeben, als es noch kein Internet gab und die Wissenschaft sehr viel weniger darüber wusste? Eine Reihe starker Beben im Zentrum der Vereinigten Staaten in den Jahren 1811 und 1812 ließ die Zahl der Mitglieder religiöser Vereinigungen nach oben schnellen, was diesen Bürgern die Bezeichnung »Erdbeben-Christen« einbrachte. Offenbar sucht mancher im Glauben Halt, wenn die scheinbar so unerschütterliche *terra firma* diesen nicht geben kann.

Doch wie verarbeiteten die Ureinwohner Kaliforniens solche Erlebnisse, jene Indianer, die dort schon Tausende von Jahren lebten, bevor die Spanier gegen Ende des 18. Jahrhunderts kamen? Sie kannten keine Schrift, hinterließen aber Spuren auf Felsen: Malereien und vor allem Petroglyphen, in den »Wüstenlack« geritzte Zeichnungen (im Lauf von Jahrtausenden bildet sich auf Felsen in wüstenhafter Umgebung eine wie lackiert wirkende braune oder bläuliche Patinierung).

Archäologen bemühen sich um den Erhalt dieser Kunstwerke, suchen, erfassen und erforschen sie. Was ihre Urheber bezweckten und ausdrücken wollten, liegt weit gehend im

Petroglyphen schmücken einen Felsen in der geothermisch aktiven Region Coso (Kalifornien).



SUSAN HOUGH


SUSAN HOUGH

Dunkeln, doch es gibt Hinweise. So symbolisieren die häufig verwendeten Zickzacklinien vermutlich Schlangen oder zumindest mit diesen Tieren verbundene Assoziationen. Einige indianische Legenden verbinden sie offenbar mit einer unruhigen Erde. Ruth Ludwin deutet zum Beispiel die Geschichte über eine Seeschlange aus dem nordwestpazifischen Raum als Überlieferung eines starken Erdbebens an der Seattle-Verwerfung um 900 v. Chr.

Legenden und auch die Felskunstwerke der Wüsten des amerikanischen Südwestens berichten vor allem von Trockenheit als wichtigster Naturkatastrophe. Doch als Geologin betrachte ich eine Karte der Petroglyphenstätten Kaliforniens und bemerke: Viele dieser Orte liegen in seismisch aktiven Regionen. Könnten manche dieser Kunstwerke Zeugnisse historischer Beben sein?

Freilich ließ sich diese Frage nicht mit dem mir geläufigen Instrumentarium beantworten, das heißt anhand quantifizierbarer, überprüfbarer Modelle. Ich betrat Neuland, benötigte Wissen einer anderen Fachdisziplin, hoffte aber auf Ergebnisse, die uns Seismologen neue Einsichten ermöglichen.

Also verfolgte ich meine Idee weiter, hörte jedoch eine skeptische Stimme, die da mahnte: Warum wunderst du dich, Felskunst nahe geologischen Verwerfungen zu finden, wo sonst sollten sie sein? Die Berge Kaliforniens sind schließlich durch seismische Prozesse entstanden. Abseits dieser Zonen erstrecken sich Täler und weite Ebenen, angefüllt mit Sedimenten, die seit Äonen von den höher gelegenen Gebieten heruntergewaschen werden. Dort gab und gibt es kaum Felsen und damit fehlte den steinzeitlichen Künstlern die Mal- und Zeichenunterlage.

Ja, dachte ich, das ist schon richtig. Aber da findet man zum Beispiel Zickzacklinien an einem Felsen mitten in der Mojavewüste. Warum hätte ein Indianer diesen Felsen mitten im Nirgendwo aufsuchen und dekorieren sollen? Doch er befindet sich nahe jener Verwerfung, die 1992 ein Erdbeben der Stärke 7,3 hervorbrachte. Und das nachweislich letzte große Beben in der ferneren Vergangenheit fand in jener Zeit statt, aus der auch die Linien stammen. Gibt das nicht zu denken?

Der grollende Seelendieb

Dergleichen ist kein Einzelfall. Nehmen wir Coso, die bekannteste Petroglyphenstätte Kaliforniens. Sie liegt in einer geothermisch aktiven Region, die wir Geologen wegen ihrer vulkanischen Geschichte der jüngeren Zeit kennen. Tatsächlich erschüttern mehr wahrnehmbare Beben (ab Stärke 3) dieses Gebiet als die meisten anderen Landstriche des Staats; in den 1990er Jahren waren es fast 300, davon sechs mit Stärken von 5,0 bis 5,8.

Natürlich möchte kein Wissenschaftler einen kausalen Zusammenhang allein auf Grund einfacher Übereinstimmungen ableiten. Die Zickzacklinien sind sicher sehr sug- ▷

▲ Zickzacklinien symbolisieren vermutlich Schlangen, diese wiederum vielleicht unter anderem Erdbeben.

EMDE-GRAFIK / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Archäologen und Seismologen kommen in Kalifornien gleichermaßen zum Zuge. Die Karte zeigt wichtige Petroglyphenstätten und Verwerfungen.

▷ gestiv, aber kein harter Beweis. Doch es ist wenig wahrscheinlich, dass jemand einen Rosetta-Stein finden wird, der ihm hilft, die Petroglyphen zweifelsfrei zu lesen. Wie anders also ließe sich meine Hypothese belegen? Vielleicht wissen die Indianer Rat, die heute in Kalifornien leben und den Mythen ihrer Vorväter nach wie vor Gehör schenken.

Der Stamm der Cahuilla-Indianer stammt ursprünglich aus Canyons in der Nähe des heutigen Palm Springs; dort fanden sie Schutz vor der sengenden Wüstensonne. Doch die Gegend ist nicht ungefährlich, denn die San-Andreas-Verwerfung verläuft mitten durch das Coachel-Tal, in dem Palm Springs liegt. Eine der indianischen Legenden bezeichnet den Tahquitz-Canyon (etwas südlich von Mount San Jacinto gelegen) als das Heim des Tahquitz, eines unsterblichen, doch übellaunigen Wesens. Jungen Frauen, die sich in der Nacht zu weit hineinwagen, stehle es die Seele. Sein Knurren verursache jenes Grollen, das manchmal am Eingang des Canyons zu hören ist.

Eine 1950 veröffentlichte Legende spricht explizit von einem Erdbeben: »Kaum hatten ihre Lippen die letzte Silbe des gefürchteten Namens (Tahquitz) ausgesprochen, als ein explosionsartiges Rumoren aus der Richtung des Canyons zu hören war. Es wurde ständig lauter, schwoll an zu einem ohrenbetäubenden Brüllen. Die Erde schwankte und zitterte unter ihren Füßen. Felsen taumelten herab und ließen die Erde abrutschen. Staubwolken stiegen auf in den verfinsterten Himmel.«

Fast alle Petroglyphen in diesem Tal wurden von Vandalen zerstört. Aber ein sehr großes Bild nahe dem Canyoneingang, von dem nur noch Reste vorhanden sind, stellte vermutlich einst einen Schamanen dar – und eine Schlange. Könnte ein sehr großes Erdbeben seinen Niederschlag in der mündlichen Überlieferung der Cahuilla gefunden haben? Vielleicht. Kleinere Beben sind in dieser Region jedenfalls nicht selten. Zwei Journalisten, die in der Nähe des Canyons wohnen, erzählten mir, dass einer Erschütterung des Erdbodens oft ein Grummeln vom Tal her vorausgeht. Und verschiedene Geologen, darunter meine Kollegen Tom Funal und Kerry Sieh vom California Institute of Technology in Pasadena, fanden sichere Indizien dafür, dass vier oder fünf starke Beben entlang der San-Andreas-Verwerfung während der letzten 1200 Jahre nahe Palm Springs auftraten, zuletzt 1676 plus/minus 35 Jahre.

Den Überlieferungen der Cahuilla vergleichbare Mythen kennen auch die Southern Dieguenos. Bei diesem Indianerstamm spielen die Superstition Mountains eine große Rolle. Auch dort berichten die Legenden von Geräuschen: ein Stöhnen und andere schreckliche Laute, die aus Höhlen schallten, in denen jene große und böse Schlange hausen sollte, die das Antlitz der Berge durch ihr Winden und Schlängeln verändert hatte. Es wundert mich nicht, dass dort Petroglyphen in Hülle und Fülle zu finden sind, viele mit Zickzacklinien: Die Superstition Mountains sind von aktiven Verwerfungen umgeben, darunter das San-Jacinto-System im Osten.

Ablehnende Reaktionen

Dass Kaliforniens frühe Bewohner Erdbeben erlebt haben, und zwar in keinem geringeren Maß, als sie in jüngerer Zeit die Oberfläche erzittern lassen, daran besteht kein Zweifel. Eingedenk der Orte der Petroglyphen und ihrer Motive scheint mir meine These sehr wahrscheinlich. Denn es wäre wohl erstaunlich, hätten diese erschreckenden Ereignisse keinen Niederschlag in den Bildwerken der Ureinwohner gefunden.

So halte ich nun einen indirekten Beleg in Händen, der ein neues Licht auf das Zusammenspiel von Naturphänomenen und den Glaubensinhalten früher Kulturen wirft. Einen Beleg allerdings, der so recht in kein Fachjournal passt. Ich sprach mit Archäologen, doch viele reagierten ablehnend auf diese Grenzüberschreitung. Meine eigenen Kollegen blieben ebenfalls skeptisch, denn Seismologen sind härtere Fakten gewöhnt. Obwohl die Notwendigkeit interdisziplinärer Forschung oft betont wird, fehlt offenbar mehr als nur die entsprechende universitäre Infrastruktur. Aber ich bin zuversichtlich, dass auch die Zweifler meine These prüfen werden. Denn ich habe für jede Fraktion ein gutes Argument, mir zuzuhören: Erdbeben und Petroglyphen, zwei faszinierende Phänomene Kaliforniens. ◁

AUTORIN UND LITERATUR

Susan E. Hough ist Seismologin beim amerikanischen Geologischen Dienst und Spezialistin für Erdbeben innerhalb kontinentaler Platten.

Finding fault in California: an earthquake tourist's guide. Von Susan Elizabeth Hough. Mountain Press, 2004



SERIE DIE WELT IM JAHR 2050

Menschheit am Scheideweg

Eine Weltbevölkerung, die bis 2050 noch um drei Milliarden wächst, dabei im Mittel an Wohlstand gewinnt, bringt unseren Planeten zusehends an den Rand seiner Tragfähigkeit. Was wir jetzt entscheiden müssen, um eine Zukunft zu haben, erklären internationale Experten in einer dreiteiligen Serie

NASA

WEITERE THEMEN IM OKTOBER

Wellen unter den Wellen

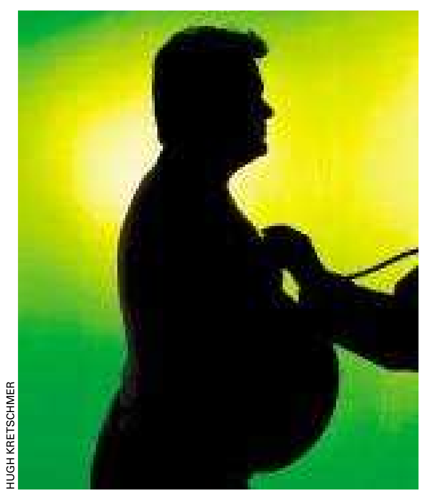
Seltsame Wogen, die im Rhythmus der Gezeiten in großer Tiefe durch die Meere ziehen, formen die Ränder der Kontinente



RICHARD SWORD

Naturkonstanten

Universell und unveränderlich ist ihr Wert, doch wäre er nur wenig anders, verhielte sich unser Universum unvorstellbar fremd



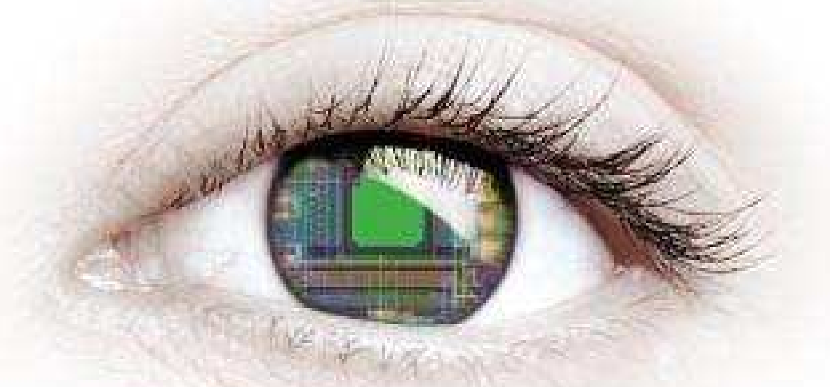
HUGH KRETSCHMER

Übergewicht überbewertet?

Kritiker behaupten, es schade mehr, als es nützt, alle bloß übergewichtigen oder gar fettleibigen Menschen zum Abnehmen zu drängen

Der Natur nachempfunden: neuromorphe Mikroelektronik

Mit Netzhautchips, welche die Rechenleistungen der Zellen im Auge nachahmen, könnten manche Erblindeten künftig wieder sehen lernen. Forscher entwerfen sogar schon Simulationen, um die Kontakte zwischen Auge und Hirnzentren naturnah neu zu bahnen



AUGE (FOTO): STONE; RETINA: KAREEM ZAGHOUL; FOTOILLUSTRATION: JEN CHRISTIANSEN